

**Vysoká škola báňská – Technická u niverzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Experimentální ověření vlivu atmosfrecikých a mechanických
jevů na komunikaci V2V a V2I pomocí technologie VLC-
OFDM na bázi SDR**

**Analysis and Experimental Verification of the Influence of
Atmospheric and Mechanic Phenomena on V2V and V2I
Communication Using VLC-OFDM Technology Based on
SDR**

2019

Bc. Norbert Brečkay

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Norbert Brečkay

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Experimentální ověření vlivu atmosférických a mechanických jevů na komunikaci V2V a V2I pomocí technologie VLC-OFDM na bázi SDR
Analysis and Experimental Verification of the Influence of Atmospheric and Mechanic Phenomena on V2V and V2I Communication Using VLC-OFDM Technology Based on SDR

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zaměřuje na implementaci VLC-OFDM (komunikace viditelným světlem pomocí ortogonálního multiplexu s frekvenčním dělením) na bázi softwarově definovaného rádia (SDR) pro komunikaci mezi vozidly (V2V) a komunikaci mezi vozidly a infrastrukturou (V2I). Práce se věnuje klasifikaci a popisu možností využití VLC-OFDM pro V2V a V2I komunikaci. Primárním cílem diplomové práce je experimentální ověření vlivu atmosférických a mechanických jevů (mechanických turbulent, teplotních turbulent, deště, mlhy, vibrací, apod.) na komunikaci V2V a V2I pomocí technologie VLC-OFDM na bázi SDR.

Postup řešení:

1. Vypracujte literární rešerši současného stavu problematiky komunikace mezi vozidly (V2V) a komunikace mezi vozidly a infrastrukturou (V2I) na bázi komunikace viditelným světlem (VCL) s využitím modulace OFDM (ortogonálního multiplexu s frekvenčním dělením). Literární rešerše vlivu atmosférických a mechanických jevů na komunikaci viditelným světlem (VLC).
2. Experimentální ověřte vlivu atmosférických a mechanických jevů (mechanických turbulent, teplotních turbulent, deště, mlhy, vibrací, apod.) na kvalitu přijímaného optického signálu za použití OFDM modulace v rámci simulačního boxu. Studie vlivu změn parametrů OFDM modulace na kvalitu přenosu (změna typu subnosných M-QAM, M-PSK, apod., změna šířky pásma, změna nosné frekvence, apod.).
3. Zpracujte a statisticky vyhodnoťte výsledky (např. srovnání vlivu, typu a počtu subnosných ve vztahu na bitovou chybovost (BER), přenosovou rychlost, dosažitelnou vzdálenost komunikace, apod., vliv šířky pásma, nosné frekvence, klasifikace odstupu signálu od šumu, apod.).
4. Diskutujte dosažené výseky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Goto, Y., Takai, I., Yamazato, T., Okada, H., Fujii, T., Kawahito, S., ... & Kamakura, K. (2016). A new automotive VLC system using optical communication image sensor. IEEE photonics journal, 8(3), 1-17.
- [2] Turan, B., Narmanlioglu, O., Ergen, S. C., & Uysal, M. (2016, December). Broadcasting brake lights with MIMO-OFDM based vehicular VLC. In Vehicular Networking Conference (VNC), 2016 IEEE (pp. 1-7). IEEE.
- [3] Goroshko, K., Manolakis, K., Grobe, L., & Jungnickel, V. (2015, June). Low-latency synchronization

for OFDM-based visible light communication. In Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on (pp. 1327-1332). IEEE.

[4] Goroshko, K., Manolakis, K., Grobe, L., & Jungnickel, V. (2015, June). Low-latency synchronization for OFDM-based visible light communication. In Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on (pp. 1327-1332). IEEE.

[5] Luo, P., Ghassemlooy, Z., Le Minh, H., Bentley, E., Burton, A., & Tang, X. (2015). Performance analysis of a car-to-car visible light communication system. Applied Optics, 54(7), 1696-1706.

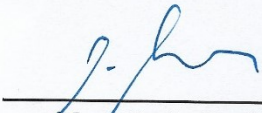
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

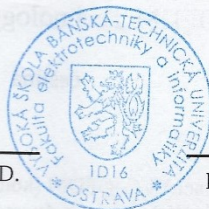
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Radek Martinek, Ph.D.**

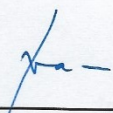
Konzultant diplomové práce: Ing. Lukáš Danys
Ing. Martin Tomis, Ph.D.

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019


prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne
pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 26. apríla 2019


.....
Podpis autora

Pod'akovanie

Týmto by som sa chcel poďakovať doc. Ing. Radekovi Martinkovi Ph.D za odbornú pomoc pri vytváraní tejto práce a takisto by som chcel poďakovať spoločnosti Varroc Lighting Systems s.r.o., ktorá mi zabezpečila prostriedky potrebné k meraniu.

Prehlásenie zástupcu spolupracujúcej právnickej alebo fyzickej osoby

„Súhlasím so zverejnením tejto diplomovej práce podľa požiadavkou čl. 26, odst. 9 Študijného a skúšobného poriadku pre štúdium v magisterských programoch VŠB-TU Ostrava.“

Dňa: 26. apríla 2019

.....


Podpis zástupcu

Abstrakt

Práca študuje komunikáciu vo viditeľnom spektre (VLC) počas ktorej bola využitá OFDM technika. Zhodnocuje vplyv nosnej frekvencie, šírky pásma a M-QAM modulácie na základe získaných výsledkov z meraní. Počas testovania parametrov kanálu bol detektor pozicovaný do rôznych vzdialenosti a horizontálnych posunoch voči vysielacu. Merania prebiehali v laboratórnych podmienkach a aj vonku kedy zhodnocuje vplyv slnka na komunikáciu. Okrem toho bol bezdrôtový prenos dát vystavený atmosférickým javom ako je dážď a hmla, ktoré boli vhodne simulované v laboratórnych podmienkach. Prínosom práce sú stanovené limity parametrov komunikačného kanálu v rôznych polohách a javov ktoré ovplyvňujú komunikáciu v reálnom čase.

Kľúčová slova

Komunikácia vo viditeľnom svetle; Atmosférické javy; Chybovosť; Spektrum

Abstract

The work studies the visible lighting communication (VLC) during which the OFDM technique was used. It evaluates the influence of carrier frequency, bandwidth and M-QAM modulation based on the results obtained from measurements. During channel parameter testing, the detector was positioned at different distances and horizontal offset to the transmitter. Measurements took place under laboratory conditions as well as outdoors when it evaluates the influence of the sun on communication. In addition, wireless data transmission has been exposed to atmospheric phenomena such as rain and fog that have been suitably simulated in laboratory conditions. The contribution of this work is to set limits of parameters of communication channel in various positions and phenomena that influence communication in real time.

Key words

Visible lighting communication; Atmospheric phenomena; Error rate; Spectrum

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	Napätie
P	W	Výkon
I	A	Prúd
L	m	Dĺžka
F	Hz	Frekvencia
V	Km/h	Rýchlosť
S	m2	Obsah
Q	c	Elektrický náboj
T	°C	Teplota
t	s	Čas

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
APD	Lavínova fotodióda (Avalanche photodiode)
AWQ	Generátor ľubovoľných priebehov (Arbitrary waveform generator)
BER	Bitová chybovosť (Bit error rate)
DC	Jednosmerný prúd (Direct current)
DSP	Digitálno signálový procesor (Digital signal processor)
FDM	Frekvenčne delený multiplex (Frequency division multiplexing)
FEC	Dopredná korekcia chýb (Forward error correction)
FFT	Rýchla Fourierová transformácia (Fast Fourier transform)
FOV	Zorné pole (Field of View)
FPGA	Programovateľné hradlové polia (Field-programmable gate array)
GPS	Globálny systém určovania polohy (Global Positioning Systems)
ICI	Interferencie medzi nosnými (Inter Carrier Interference)
IFFT	Inverzná rýchla Fourierová transformácia (Inverse Fast Fourier Transform)
ISI	Interferencia medzi symbolmi (Inter Symbol Interference)
LED	Dioda emitujúca svetlo (Light-Emitting Diode)
LOS	Priama viditeľnosť (Line of Sight)
NI	National Instruments
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK	Dvojstavové klúčovanie (On-Off Keying)
PPM	Puzlne pozičná modulácia (Pulse-position Modulation)
PWM	Pouzne šírková modulácia (Pulse-width Modulation)
QAM	Kvadraticko amplitúdova modulacia (Quadrature Amplitude Modulation)
RF	Rádiová frekvencia (Radio Frequency)
RGB	Červená zelená modrá (Red Green Blue)
RX	Prijímač (Receiver)
SNR	Odstup signálu od šumu (Signal-to Noise Ration)
TX	Vysielač (Transmitter)

USRP	Softvérovo definované rádio (Universal Software Radio Peripheral)
V2V	Vozidlo k vozidlu (Vehicle to Vehicle)
V2I	Vozidlo k infraštruktúre (Vehicle to Infrastructure)
V2B	Vozidlo k budové (Vehicle to Building)
V2P	Vozidlo ku chodcovy (Vehicle to Pedestrian)
VLC	Komunikácia vo viditeľnom spektre (Visible Lighting Communication)
Wi-Fi	Bezdrôtové spojenie (Wireless Fidelity)

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Komunikácia ve viditeľnom svetle	- 16 -
1.1 VLC komunikácia v automobilovej doprave	- 16 -
1.2 Prevedené merania	- 18 -
1.2.1 Systém fungovania vysokorychlostných kamier	- 19 -
1.2.2 VLC využívajúcu vysokorychlostnú kameru	- 20 -
1.2.3 VLC využívajúci fotodiody - Experiment 1	- 23 -
1.2.4 VLC využívajúce fotodiody - Experiment 2	- 27 -
1.2.5 VLC využívajúce solárneho panelu.....	- 30 -
1.2.6 Sumarizácia testov.....	- 32 -
2 Základy OFDM	- 35 -
2.1 Základný princíp OFDM.....	- 35 -
2.2 OFDM modulátor	- 36 -
2.3 Potlačenie viaccestného šírenia.....	- 37 -
2.4 Sumarizácia	- 39 -
3 Vplyv atmosférických javov	- 40 -
3.1 Efekt hmly a dažďu na VLC v programovej simulácii	- 41 -
3.1.1 Simulácia prostredia	- 41 -
3.1.2 Výpočty	- 42 -
3.1.3 Sumarizácia	- 42 -
3.2 Vplyv piesočnej búrky	- 43 -
3.2.1 Typy piesočnej búrky	- 44 -
3.2.2 Parametre.....	- 44 -
3.2.3 Výsledky.....	- 45 -
3.3 Test hmly pri reálnych podmienkach	- 46 -
3.3.1 Experiment	- 46 -
3.3.2 Simulácia.....	- 47 -
4 Experimentálna časť časť	- 49 -
4.1 Zoznam prístrojov	- 50 -

4.1.1	USRP 2954R	- 52 -
4.1.2	Zosilňovač	- 53 -
4.1.3	Bias tee	- 53 -
4.1.4	Zdroj svetla.....	- 53 -
4.1.5	Fotodetektor.....	- 57 -
5	Výsledky meraní	- 59 -
5.1	Predný svetlomet.....	- 60 -
5.1.1	Šírka pásma	- 63 -
5.1.2	Závislosť BER na vzdialenosti	- 65 -
5.1.3	Horizontálny posun	- 67 -
5.2	Zadný svetlomet	- 69 -
5.2.1	Šírka pásma	- 71 -
5.2.2	BER vs vzdialenosť	- 73 -
5.2.3	Horizontálny posun	- 74 -
6	Vplyv dažďu.....	- 76 -
6.1	Predný svetlomet.....	- 76 -
6.2	Zadný svetlomet	- 79 -
7	Vplyv hmly.....	- 83 -
7.1	Predný svetlomet.....	- 84 -
7.2	Zadný svetlomet	- 86 -
8	Vplyv vibrácií.....	- 91 -
8.1	Predný svetlomet.....	- 92 -
8.2	Zadný svetlomet	- 95 -
9	Zrovnanie laboratórnych podmienok a reálnych.....	- 97 -
9.1	Predný svetlomet.....	- 98 -
9.2	Zadný svetlomet	- 100 -
	Záver	- 104 -
	Použitá literatúra	- 106 -
	Priložené CD	I

Úvod

Neustály rozvoj kvality dopravy a dopravnej infraštruktúry obecné zahrnuje široké spektrum prvkov, medzi ktoré patrí realizácia nových dopravných stavieb, požiadaviek na vyššiu ekologickosť dopravy a predovšetkým v metropolitných oblastiach rozvoj plynulosti dopravy. Kľúčovým prvkom je bezpečnosť, jej potenciál môžeme najst' v rýchlo sa rozvíjajúcej bezdrôtové komunikácii medzi subjektami v doprave. Tie využívajú v kooperatívnych inteligentných dopravných systémov (C-ITS)[4], kde sú jednotlivé vozidlá schopné medzi sebou navzájom zdieľať informácie o aktuálnom stave dopravnej situácie. Tieto systémy bývajú označované obecné ako V2X, pričom v prípade komunikácie medzi jednotlivými vozidlami sa užíva špecifickejšie označenie V2V (Vehicle-to-Vehicle) a v prípade komunikácie medzi vozidlom a infraštruktúrou sa používa označenie V2I (Vehicle-to-Infrastructure). Komunikácia je teda realizovaná prostredníctvom technológie VLC (Visible Light Communication), teda komunikácia vo viditeľnom svetle. Informácia je v tomto prípade prenášaná v rozsahu viditeľného spektra (380 - 780 nm), respektíve jej časti ktorá závisí na použitom zdroji, viz [2].

Komunikácia vo viditeľnom spektre presiahla svoj potenciál keďže dokáže využívať LED (Light Emitting Diode) osvetlenie aj pre komunikáciu. Aplikáciou tejto komunikácie je možné prenášať veľké objemy dát, v dnešnej dobe až 1 Gbps, viz [1]. Aby bolo dosiahnuteľné tohoto vysokorýchlostného a predovšetkým spoľahlivého systému pro transport dát a informácii, je potrebné aplikovať modulačnú techniku OFDM (ortogonálne frekvenčne delený multiplex). Spomínaná modulačná technika je súčasť dnešných komunikačných kanálov a využíva metódu rozprestretého spektra pro rozdelenie dátového toku. Pre popísaný systém je dôležitá synchronizácia, ktorá predstavuje najväčší problém u OFDM, viz [7, 12].

Táto práca sa zaoberá experimentálnym overením vplyvu atmosférických a mechanických javov na komunikáciu v oblasti dopravnej infraštruktúry, konkrétne komunikácie typu V2V a V2I, a to za použitia technológie VLC-OFDM na báze SDR (Softwarovo definované rádio) [9]. Obecné je možné zhrnúť, že práce sleduje štandardné atmosférické (napr. mlha, dážď, a pod.) či mechanické javy a vyhodnocuje ich pôsobenie na skúmaný typ komunikácie. Z logického hľadiska je práce členená do dvoch hlavných častí, kedy sú najprv predstavené teoretické východiská, zapracované na základe odbornej literárnej rešerši, a nadväzuje aplikačná (experimentálna) časť práce, v rámci ktorej sú najmä stanovené predpoklady sledované v prevedenom experimente.

Teoretická časť práce v prvom rade predstavuje OFDM ako techniku pre prenos informácii v komunikačných systémoch. OFDM je stručne predstavená vo svojom historickom, ale i súčasnom stave a aktuálnych dispozíciách vo sledovaných oboroch. Bližšie je predstavený princíp OFDM a popísaný je tiež ortogonálne delenie subnosných vln. Úzko sú zhrnuté vlastnosti OFDM, kľúčové výhody a nevýhody a tiež i možnosti aplikácia tejto techniky. V ďalšej kapitole je pozornosť obrátená na experimentálne merania za použitia signálu OFDM, kde sú skúmané celkom tri možnosti VLC komunikácie vo štyroch odlišných experimentoch.

Pre prenos informácie od vysielača k prijímaču je použitá vysokorýchlostná kamera, fotodióda a solárny panel. Jednotlivé výstupy vykonaných experimentov sú vzájomne porovnané.

V experimentálnej časti sa budem zaoberať testovaním VLC komunikácie. Ako zdroje vysielať budem používať denné svietenie predného svetlometu a brzdomé svetlo zadného svetlometu. Na prijímanie komunikácie použijem PIN fotodiódu od firmy Thor labs so zaostrovaciu čočku ktorá má za úlohu koncentrovať svetlo na anténu časť fotodetektoru. Detektor bude staviť do rôznych polôh voči svetlometu s cieľom najť limity pri ktorých je možné komunikovať. Okrem pozíc detektoru sa budú meniť aj parametre komunikačného kanálu. Pre jednotlivé svetlá sa bude meniť nosná frekvencia, šírka pásma a modulácia M-QAM s cieľom nájsť ideálne parametre a limity pre komunikáciu s daným hardverom. Hlavnou výpočtovou hodnotou bude chybovosť BER, pri ktorej budem považovať 10^{-3} za prijateľnú. Pri meraniach som schopný sledovať chybovosť do 10^{-6} . Merania budú vykonané v laboratorných podmienkach a aj vonku, kde sa budem snažiť kvalitne zhodnotiť vplyv slnečného žiarenia. V laboratorných podmienkach sa budem tiež snažiť podrobiť experiment nepriaznivým vplyvom ako je dážď, hmla a vibrácie.

1 Komunikácia vo viditeľnom svetle

Komunikácia vo viditeľnom svetle (ďalej len VLC) je jednou z možností optickej bezdrôtovej komunikácie. Ghassemlooy (2012) uvádza, že k bezdrôtovému prenosu dochádza vo voľnom priestore na základe svetelného žiarenia. Celý systém optickej bezdrôtovej komunikácie všeobecne spočíva vo vstupe informácie do riadiaceho obvodu, ktorý ho spracuje do formy optického signálu. Zdrojom vysielania tejto informácie potom môže byť laserová dióda alebo svetlo emitujúca dióda (LED). Signál je následne zachytený na druhej strane fotodiódou s intrinsickou vrstvou (PIN) alebo lavínovú diódou (APD) a zachytená informácia je následne transformovaná späť do svojho pôvodného formátu. Rovnaký zdroj uvádza možnosti rádiovú frekvenčnej bezdrôtovej komunikácie a ďalšie príklady optickej bezdrôtovej komunikácie (napr. Komunikácia v infračervenom svetle).

Ako ale uvádza Haas (2011) [3], tak kľúčovou myšlienkou je komunikácia vo viditeľnom svetle, ktorá užíva svetlo ako k samotnému osvetleniu, tak aj k prenosu dát. Medzi najväčšie prednosti tejto formy komunikácie je fakt, že vďaka osvetleniu prebieha tiež prenos dát a nie je potrebné vynakladať dodatočnú energiu. Jednotlivé prvky pre vytvorenie komunikácie v danom systéme sú cenovo i fyzicky veľmi dobre dostupné a komunikácie možno využívať aj v takom prostredí, kde nie je povolená rádiová komunikácia (napr. Letectvo). Medzi ďalšie výhody potom možno zaradiť vysokú rýchlosť dátového prenosu, široké voľne použiteľné pásmo a nízku cenu.

Ghassemlooy (2012) [1], ale aj ďalšími autormi potom uvádzajú široké možnosti využitia danej technológie. Jej dvojité funkcionality vedie k potenciálne možnosti vytvorenia radu zaujímavých aplikácií, medzi ktoré možno zaradiť domáce vysokorýchlostné pripojenie z osvetlenia či pokrytie paluby lietadiel týmto signálom. Najväčší význam však možno očakávať v LED diódach vo vlakoch, automobiloch a semaforoch, ktoré majú vplyv na dopravnú infraštruktúru. LED diódy navyše majú rad predností proti iným (známejším) zdrojom svetla, ako je dlhšia životnosť, šírka ich pásma, fyzická veľkosť a spotreba energie. LED diódy sú navyše štandardne primárne užívané na účely osvetlenia a spotreba energie za účelom prenosu dát je minimálna.

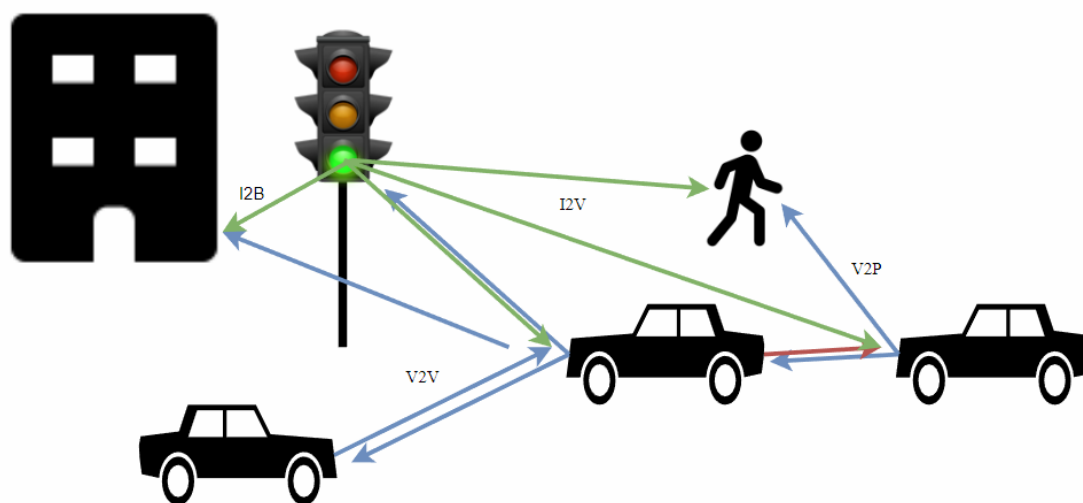
1.1 VLC komunikácia v automobilovej doprave

O možnostiach využitia technológie v prostredí automobilovej dopravy sa zmienil už výrazne skôr Lee (2008), podľa ktorého VLC komunikácia predstavuje ideálnu alternatívu k existujúcim bezdrôtovým technológiám, zaisťujúcim komunikáciu medzi infraštruktúrou a vozidlom v rámci inteligentného dopravného systému (IDS). Zdroj vo svojej štúdii predstavil možnosť zvýšenia vtedajšieho dosahu na 20 m, kde by bolo možné využiť rýchlosť prenosu až 10 Mb / s. Danú tému ďalej rozvinul vo svojom článku Kumar (2011) [4], ktorý videl potenciál využitia danej technológie na zvýšenie bezpečnosti cestnej premávky. V štúdii potom sledoval špecifické modulačné techniky, ktoré vedú k zmierneniu rušenia spôsobeného vonkajšími svetelnými zdrojmi.

V ďaleko širšom kontexte však hovorí o VLC komunikácii v automobilovej doprave Yamazato (2014) [10], ktorý upozorňuje na fakt, že skoršie systémy realizovali komunikáciu medzi automobilmi či prvkami infraštruktúry predovšetkým za využitia rádiovkej technológie a preto sa rozhodol tento pôvodný systém so súčasnou VLC technológiou (založenou na obrazovom snímači) vzájomne porovnať.

V tomto zmysle potom zdroj upozorňuje predovšetkým na prácu systému vo vizuálnom priestore, ktorý umožňuje obrazové spracovanie informácie a v konečnom dôsledku prispieva k bezpečnosti automobilovej dopravy. Celkové možnosti využitia popísanej technológie potom vytvárajú tlak na rastúci záujem o inteligentné dopravné systémy, viz[3].

Typickou aplikáciou týchto funkcií je prenos dát pomocou LED na semaforoch a brzdových svetiel, viz[3]. Opísané systémy sú potom zvyčajne známe ako koncepty V2I-VLC a V2V-VLC, pričom V2I je skratkou pre komunikáciu vozidla s prvkami infraštruktúry (Vehicle-to-Infrastructure) a V2V pre komunikáciu medzi vozidlami navzájom (Vehicle-to-Vehicle). V poslednej dobe sa tiež hovorí aj o komunikácii V2P (Vehicle-to-Pedestrian) a V2B (Vehicle-to-Building) ktorá zahŕňa chodcov a budovy. Tie teda umožňujú odovzdanie najrôznejších druhov dát a informácií medzi jednotlivými prvkami automobilovej dopravy vo forme svetla. V2V komunikáciu v reálnom svete dobre znázorňuje obrázok 1 pod textom, ktorý vhodne uvádza príklady takýchto svetelných komunikátorov v bežnej dopravnej infraštruktúre.



Obrázok 1 - Ukážka komunikácie V2V, I2V, V2B a V2P

Vyššie uvedený zdroj [2,10] podrobil oba systémy (V2V a V2I) testovaniu, kde preukázal ich funkčnosť pri špecifických situáciách. Komunikácia V2I bola simulovaná za pomoci vysielateľa s LED diódou, pričom prichádzajúci signál bol zachytený pomocou kamery. Za daných podmienok bolo dosiahnuté rýchlosti 32 kb/s pri prenose zvukových signálov v reálnom čase. Vysokorýchlostný prenos v rámci V2V komunikácie s využitím správnej detekcii LED bola dosiahnutá prenosová rýchlosť 10 MB / s v reálnom čase. Výstupom merania bol

farebný obraz formátu QVGA pri frekvencii snímok 10 fps. Za možnú nevýhodu systému možno považovať prispôbenie pohybu áut na cestných komunikáciách, kedy môže dochádzať k prerušeniu prenosu signálu v dôsledku vzájomného clonenia a prenesené informácie by nemuseli mať dostatočnú kvalitu. Pre tieto účely by bolo vhodné, podľa názoru autora, doplniť systém VLC o podporný prenos signálu pomocou rádiových vĺn za účelom zlepšenia komunikácie.

Popísaný systém ponúka široké spektrum využitia, ktoré sa týkajú zvýšenia plynulosti premávky a zlepšenie jeho bezpečnosti, ak prijímač obsahuje obrazové čidlo, kameru alebo iný spôsob príjmu dát, viz [2]. Konkrétne je možné formou spracovania obrazu alebo videa identifikovať ostatné pohybujúce sa vozidlá na cestných komunikáciách a integrovať ich do bezpečnostných aplikácií. Systém je potom schopný vyhodnotiť pohyb oboch vozidiel a odhadnúť ich vzájomnú bezpečnú vzdialenosť. Táto možnosť nachádza aj výhľadové využitie u adaptívnych tempomatov, varuje posádku automobilu pred možnými kolíziami s prvkami dopravy ako je automobil a tiež dokáže detekovať pohybujúcich sa chodcov. Treba však uviesť, že vyššie opísané informácie sú len potenciálne vybrané aplikácie systému z roku 2014. S rozvojom technológií u popredných svetových výrobcov možno očakávať aj rastúci význam o tuto technológiu používania VLC komunikácie predovšetkým v oblasti celkovej automatizácie dopravy (podklady pre navigácie, udržanie sa v jazdných pruhoch, parkovanie, apod.).

Experimentálne merania pri využití danej technológie boli už niekoľkokrát vyskúšané a jeho funkčnosť bola preukázaná, ako je uvedené v experimentoch v kapitole č. 1. Yamazato (2014)[10] napriek tomu uvádza, že VLC komunikácia bola už vyskúšaná a použitá mimo systému automobilovej dopravy, konkrétne v námornej navigácii, založené na majákoch. Dané signály boli prenášané z boji do vzdialenosti až 2 km. Systém preukázal svoju účinnosť ďalej v leteckej doprave, a to pri ich vzlete a pri pristátí. Najväčší potenciál je však v súčasnosti v automobilovej doprave.

Pre zaznamenanie informácie slúžia CMOS snímače, ktoré sú pre tieto účely efektívne vzhľadom na ich multifunkcionalitu a zanedbateľnej spotrebe energie. Nevyhnutnou súčasťou systému je ďalej fotodióda, ktorá zachytáva optický signál a následne ho transformuje na elektrický signál. V kontexte je vhodné uviesť, že CMOS snímač môže slúžiť aj pre príjem VLC signálu. Ich špecifickou výhodou je v tomto prípade schopnosť priestorového oddelenia zachytených obrazových bodov a z toho plynúce následné korektné spracovanie informácie.

1.2 Prevedené merania

Súčasť tejto kapitoly je predstavení štyroch vykonaných meraniach VLC za použitia OFDM. V nasledujúcich podkapitolách sú tak tieto merania bližšie predstavené. V dvoch uvedených prípadoch bola ako detektor použitá fotodióda, v jednom z prípadu vysokorýchlostná kamera a v poslednom prípade bol aplikovaný solárny panel. Všetky merania sú zbežne popísané a pozornosť je upriamená predovšetkým na získané výsledky.

1.2.1 Systém fungovania vysokorýchlostných kamier

V rámci experimentu pri využití vysokorýchlostných kamier je vhodné bližšie popísať ich systém fungovania a zachytávania vysielanej informácie vo forme optického signálu. Yamazato (2014)[10] uvádza, že pre bezproblémový príjem vysielaného signálu je nevyhnutné zabezpečiť dve požiadavky. Prvým z nich je vysokorýchlostný príjem optického signálu, ktorý by mal optimálne dosahovať rýchlosť min. 10 Mb / s, čo umožní získať všetky relevantné dáta o prevádzke, vozidle, prípadne dopravnú situáciu v reálnom čase.

Druhou požiadavkou je presná detekcia LED v reálnom čase za účelom nadviazania tejto komunikácie s objektom, ktorý sa zvyčajne (teda v prípade V2V komunikácie) pohybuje. Na splnenie tejto druhej podmienky bol vyvinutý nový typ snímača CMOS pre získanie optického komunikačného obrazu. Ten využíva dva nové typy technológie, medzi ktoré patrí využívanie komunikačných pixelov (CPx) a tvorba informačného výstupu prostredníctvom 1-bitovej funkcie.

Pri rozbere danej témy je vhodné sa detailnejšie zamerať na rozbor oboch prvkov, ktoré sa nachádzajú v pixelovom poli. Tým je vyššie uvedený CPx, ktorý zaisťuje vysokorýchlostný príjem opticky vysielaného signálu, zatiaľ čo IPx v systéme pracuje ako senzor obrazu. Tieto dva prvky spolu tvoria jeden pixel. Kým IPx je bežne používaný systémový prvok, tak CPx je špecializovaný na komunikáciu (rýchlosť odozvy), pričom jeho výkon pri prijímaní signálu je desaťkrát vyššia ako u iných obrazových snímačov. Samotný CPx ale nie je schopný zachytiť obraz. Z toho dôvodu je nevyhnutné do OCI začleniť vyššie popísanú hybridnú štruktúru pixelov, ktorá vstrebáva zachytený obrazový signál pomocou poľa IPx a optický signál prijímaný cez pole CPx.

Z pixelového poľa je pomocou čítacích obvodov vyvedený tzv. Obrazový snímok a intenzitný snímok pri rýchlosti snímania obrazu 60 fps. Intenzitný snímok je potom rozložený komparačným obvodom, ktorý vylúči objekty s nízkou intenzitou svetla a uchová iba tie s vysokou intenzitou, ako sú LED diódy, pouličné osvetlenie či slnečné žiarenie. Umožňuje tiež odstránenie nežiaducich efektov a javov, ako je napr. slnečné žiarenie, tým že prestane prijímať optický signál od prvkov poľa CPx, na ktoré nedopadá signál určený ku komunikácii. Jeho priestorové snímanie okolia je možné napríklad použiť na detekciu jazdných pruhov alebo po ceste sa pohybujúcich chodcov a pod. Celý systém funguje veľmi rýchlo a operácie snímania sa opakuje v časovom intervale až 16,6 ms.

Záverom popisovaného systému je vhodné doplniť informácie strán kvality prenosu dát v porovnaní s odlišnými technológiami, ktorým je v rámci tejto práce venovaná pozornosť. V prvom rade je potrebné uviesť, že dané obrazové spracovanie spojenia u vysokorýchlostné kamery (proces detekcie obrazu) má vyššie hardvérové nároky v porovnaní so spracovaním signálu fotodiódou, ktorá má nižšie technologické nároky. Vzhľadom k vyššie popísaným skutočnostiam je potrebné uviesť, že vysokorýchlostná kamera (užívaná ako detekčné zariadenie) detekovaný obraz rozkladá a následne je na ňom schopná nájsť intenzitu. Na základe toho je možné pohotovo deaktivovať (vypnúť) snímanie takých pixelov kamery, na ktoré nedopadajú žiadne informácie, čo ponecháva väčší priestor pre príjem a spracovanie dát.

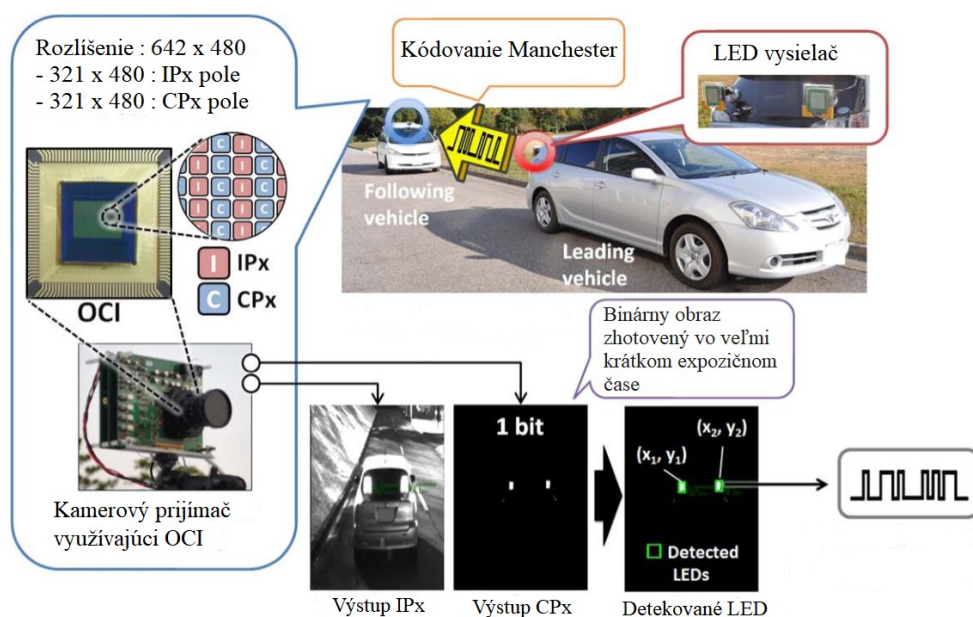
V praktickom ponímaní možno nazerať na danú situáciu ako na moment, kedy sú získavané informácie iba zo zadných svetiel vpredu idúceho auta, zatiaľ čo ostatné informácie sú ignorované.

1.2.2 VLC využívajúcu vysokorýchlostnú kameru

Iný experiment týkajúci sa VLC komunikácia v oblasti V2X bol realizovaný na Nagoya University v Japonsku, kde v čele výskumného tímu v roku 2016 stál vtedajší študent Yuki Goto so svojim tímom. Komunikácia v tomto prípade prebieha medzi diódou a vysokorýchlostnou kamerou, ktorá využíva špeciálny obrazový snímač CMOS, teda optický komunikačný obrazový snímač (OCI sensor – Optical Communication Image Sensor) a tiež optický komunikačný systém zaisťujúci komunikáciu V2V, ktorý už dokázal svoju funkčnosť v externých podmienkach a dosiahol rýchlosť prenosu 10 Mbps. Pri realizácii nasledujúceho experimentu však došlo k implementácii OFDM a vzhľadom k vyššej efektívnosti daného systému bol očakávaný výrazne vyššia rýchlosť prenosu dát. Priepustnosť tak bola v danom experimentu nastavená na 45 Mbps, 50 Mbps a 55 Mbps.

1.2.2.1 Systémový model

Na obrázku 2 [2] pod textom je zachytený systém V2V komunikácie, ktorý využíva vysokorýchlostnú kameru na báze OCI. Tá je schopná zachytiť sledovaný obraz v dvoch formátoch, a teda ako čiernobiely (resp. šedý) obraz a ďalej ako 1-bitový príznak. Tento binarizovaný obraz je možné zachytiť pri veľmi krátkom expozičnom čase a systém je následne schopný identifikovať oblasti s LED vysielateľom, z ktorých následne prijíma optické signály. V bežnom procese prebieha táto operácia nepretržite, čím dochádza k súvislému príjmu vysokorýchlostného optického signálu s dostatočnou detekciou LED vysielateľa. Nastavenie vysokorýchlostnej kamery na báze OCI je jedným z najefektívnejších spôsobom a môžeme teda očakávať, že tento systém sa dočká širokého uplatnenia.



Obrázok 2 - Schematický popis provozu komunikácie V2V, založeného na bázy OCI. Kamerový prijímač OCI zaznamenáva obraz a 1-bitový príznak. Týmto spôsobom sú detekované LED ich optické signály sú detekované cez CPx.

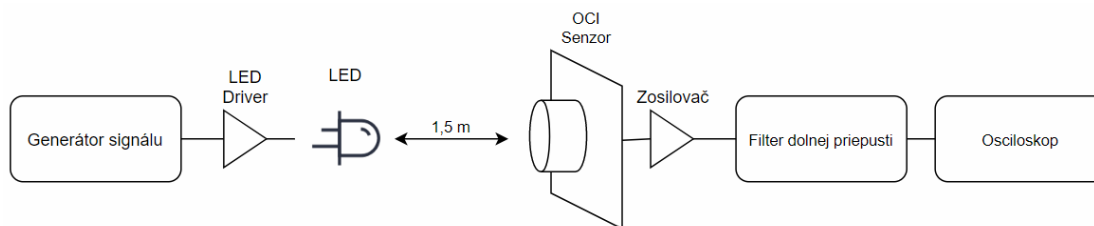
Tento systémový model poukazuje na princíp fungovania a funkčnosť VLC komunikácie, ktorá využíva CMOS senzor vo vonkajších podmienkach. Taktiež predtvaruje základ pre štúdiu, ktorá sa pokúsila implementovať techniku OFDM do experimentu

1.2.2.2 Experimentálne nastavenie

V rámci špecifikácie experimentálneho modelu je v prvom rade vhodné priblížiť jednotlivé aspekty použitého kamerového prijímača. Ohnisková vzdialenosť objektívu bola nastavená v danom experimente na 50 mm, frekvencia spojenia dosahovala 35 MHz a vzdialenosť prijímača (kamery) od vysielateľa (LED diódy) bola 1,5 m. Je však vhodné doplniť, že komunikačný výkon tohoto systému bol nezávislý na komunikačnej vzdialenosti. Dá sa teda predpokladať, že kamera s technológiou OCI dokáže pohotovo a korektne identifikovať LED vo vonkajšom prostredí (i keď v rámci experimentu nie je toto prostredie simulované). Tiež je vhodné bližšie špecifikovať použitou LED diódu vyžarujúcu červené svetlo, jej najvyššia vlnová dĺžka dosahuje 630 nm, meraná medzná frekvencia je 14,5 MHz, uhol polovice intenzity je 8° a priemerne napätie na LED je 2,08 V.

Experimentálne nastavenie systému pre dané meranie je graficky vo forme zjednodušenej schémy zachytené na obrázku 3 pod textom. Na začiatku daného schémata je systém, ktorý generuje vysielané data i informácie. Tie sú následne transformované do podoby, ktorou je schopná spracovať LED dióda a ktoré sú vysielané smerom k vysokorýchlostnému kamerovému prijímaču. I keď bol tento experiment realizovaný bez pohybu oboch zariadení, tak technologické možnosti OCI vhodne simulujú meranie, ktoré je pak zrovnateľné s reálnou

prevádzkou. Po prenesení signálu dochádza k jeho zosilneniu na požadovanú napäťovú úroveň za pomoci zosilovača a následne je digitálne zaznamenaný do osciloskopu.



Obrázok 3 - Nastavenie systému s vysokorýchlostnou kamerou

Tiež je vhodné priblížiť obecný systémový model s technológiou optické OFDM, založený na OCI, teda špecifikácie jednotlivých krokov vysielača a prijímača. V rámci nej v prvom rade dochádza ku kódovaniu informačných bitov za použitia metódy korekcie doprednej chyby (FEC), tou je napríklad konvolučný kód. Informačné bity (už kódované) sú následne konvertované zo sériových na paralelné, digitálny signál je zmenený na analógový a potom dochádza k aplikácii algoritmu inverznej rýchlej Fourierovej transformácie (IFFT). Bipolárny vysielač následne transformuje signál na unipolárny a informácia je predaná LED dióde, ktorá ju vysiela skrz optický kanál smerom k prijímaču (kamere). Ta zaznamenáva ako komunikačné, tak i obrazové pixely. Následne opäť prebieha spätná transformácia analógovej informácie na digitálnu a konverzia paralelných informačných bitov na sériové. tiež je opäť použitá rýchla Fourierová transformácia (FFT). V samotnom závere je výsledný signál opäť dekódovaný pri použití metóde korekcie doprednej chyby (FEC), viz [41].

Pri realizovanom experimente bola šírka pásma nastavená na niekoľko hodnôt, ktoré sa nachádzali v rozmedzí od 12,8 do 40 MHz. Pri minimálnej šírke pásma (12,8 MHz) bola frekvenčná odozva zoslabená približne o 20 dB, zatiaľ čo pri maximálnej (40 MHz) dosahovalo zoslabenie viac než 40 dB. Meraná kapacita potom poukazovala na postupný nárast pri rastúcej šírke pásma v rozmedzí od 12,8 MHz do cca 32 MHz. V ostávajúcom rozsahu (32 - 40 MHz) už bol nárast minimálny, čo znamená, že vysokofrekvenčné subnosné nosiče, ktorých frekvencia presahuje 32 MHz, prispievajú k celkovej kapacite iba veľmi málo. Ideálna pracovná šírka pásma by na základe zistených poznatkov mala nadobúdať zhruba 30 MHz až maximálne 34 MHz. 32 MHz je vhodnou výchozí hodnotu pri meraní pásem a z toho dôvodu je aplikovaná v prevedenom experimente.

1.2.2.3 Zhodnotenie experimentu

V prípade tohoto experimentu bolo použito OFDM, a to s amplitúdovou moduláciou 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM 256-QAM. Meranie za použitia vysokorýchlostných kamier bolo cielené na rýchlosť prenosu dát vo výške 45 Mbps, 50 Mbps a 55 Mbps a vo všetkých jednotlivých prípadoch bola rovne sledovaná bitová chybovosť (BER), ktorá mala rastúcu tendenciu priamo úmernu vždy dané (skumané) rýchlosti dát. Je vhodné si všimnúť, že v prvom prípade (najnižšia priepustnosť) dosahuje nulové hodnoty.

Ďalej je vhodné upozorniť na samoopravný (resp. konvolučný) kód (vyjádrený ako „ k/n “) o veľkosti 1/2, resp. 3/4. Ten udáva, že na „ k “, teda každý jeden (resp. tri) bity užitočných informácií kóder generuje „ n “, teda dva (resp. štyri) bity dát, pričom „ $n-k$ “ dát je redundantných, v tomto prípade teda vždy jeden bit dát. Kombináciou jednotlivých faktorov je získané veľké množstvo výstupov. Získané poznatky sú vhodne zhrnuté v tabuľke 1.1 pod textom. V neposlednej rade je taktiež vhodné doplniť informáciu o nastavenej vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom, ktorá v tomto prípade bola 1,5 metrov.

Tabuľka 1.1: *zhrnuté výstupy prevedeného merania vysokorýchlostnou kamerou*

Kódová sadzba	Cielená prenosová rýchlosť [Mbps]	Priepustnosť [Mbps]	BER	
3/4	60	45	0	(0/1,01×10 ⁷)
	66,7	50	7,68×10 ⁻⁷	(8/1,02×10 ⁷)
	73,3	55	4,48×10 ⁻⁶	(49/1,09×10 ⁷)
1/2	90	45	0	(0/1,01×10 ⁷)
	100	50	3,11×10 ⁻⁶	(32/1,03×10 ⁷)
	110	55	9,17×10 ⁻⁶	(99/1,08×10 ⁷)

Ako bolo v danom experimente sledované, tak aplikovaný systém využívajúci OFDM značne prekračuje súčasné komunikačné štandardy v oblasti V2X a poukazuje na svoj vysoký potenciál v ďalšom vývoji. Získané údaje zároveň vykazujú vysokú stabilitu, na čo má vplyv OCI senzor. Pravdepodobne tak môžeme očakávať, že práve táto technológia vysokorýchlostných kamier bude kľúčová pre použitie V2X komunikácie a bude tak implementovaná do najväčšieho množstva automobilov.

1.2.3 VLC využívajúci fotodiody - Experiment 1

Ďalším z experimentov je projekt Wen-Hsuan Shen a Hsin-Mu Tsai, ktorý bol realizovaný na oddelení výpočtových vied a informačného inžinierstva v rámci National Taiwan University v Taipei, viz [9]. Na rozdiel od ostatných pokusov bol tento realizovaný priamo v teréne u dvoch idúcich automobilov na 108 kilometrovej dráhe (vzdialenosť medzi automobilmi dosiahla až 45 metrov), pričom ako prijímač v rámci VLC komunikácie bola v tomto prípade využitá fotodióda, zachytávajúca daný signál na strane prijímača, zatiaľ čo ako vysielateľ fungovali zadné LED svetlá automobilu.

1.2.3.1 Systémový model

Pre získanie vhodných výstupov pokusu bol experiment realizovaný v reálnom prostredí, ktoré vyžadovalo prispôbenie jednotlivých parametrov experimentu. Primárne sa táto špecifikácia týkala pracovného rozsahu, ktorý dosahuje 45 metrov. S tým súvisela rada ďalších komplikácií. V prvom rade bolo nevyhnutné zabezpečiť stabilné komunikačné spojenie medzi oboma vozidlami, pre ktorých je nevyhnutná robustnosť modulačnej schémy v prípade veľmi hustej premávky a odolnosť proti viacúrovňovému skresleniu získaných informácií. VLC systémy využívajúce OFDM majú schopnosť zmierniť medzisymbolové presluchy (ISI - Inter-

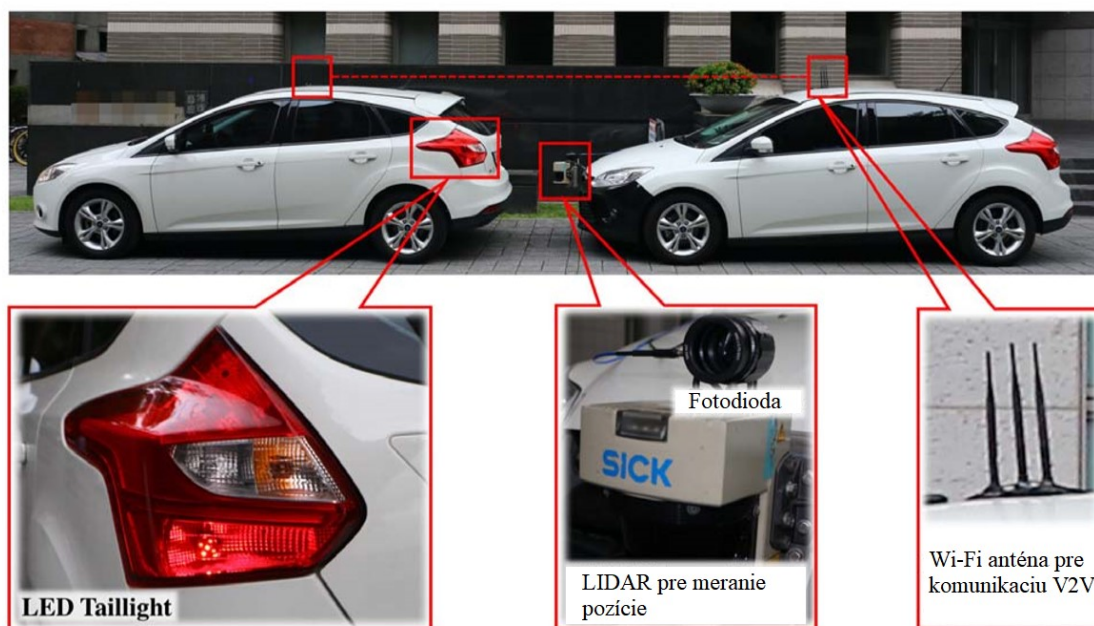
symbol interferencie) a sú tak ideálnou voľbou pre cestné prostredie. Druhým problémom bolo nastavenie zadných LED svetiel, ktoré sa používajú ako vysielacie subjekty v experimente a ktoré majú jasne definovanú signalizačnú svetivosť, ktorá sa s rastúcou vzdialenosťou znižuje. Tento problém bol v experimente riešený pomocou novej softvérovej a hardvérovej techniky, vyvinutej špeciálne pre VLC komunikáciu vo V2V prostredí, viz [9].

1.2.3.2 Experimentálne nastavenie

Pre vhodné popísanie celého experimentu je vhodné detailnejšie špecifikovať všetky jeho súčasti, teda predovšetkým umiestnenie vysielача a prijímača a ich parametre. Je vhodné pripomenúť, že experiment bol vykonávaný na dvoch automobiloch počas jazdy, teda v reálnom svete. Pre meranie boli použité automobily firmy Ford Focus (2015), model C346 1.6L označené ako "predné" a "zadné" vozidlo s fungujúcim jednosmerným spojením. Spočítaná vzdialenosť (45 m) medzi automobilmi bola určená na základe priemernej rýchlosti 90 km / h pri rozstupe medzi automobilmi v rozsahu 1,6 až 1,8 sekúnd.

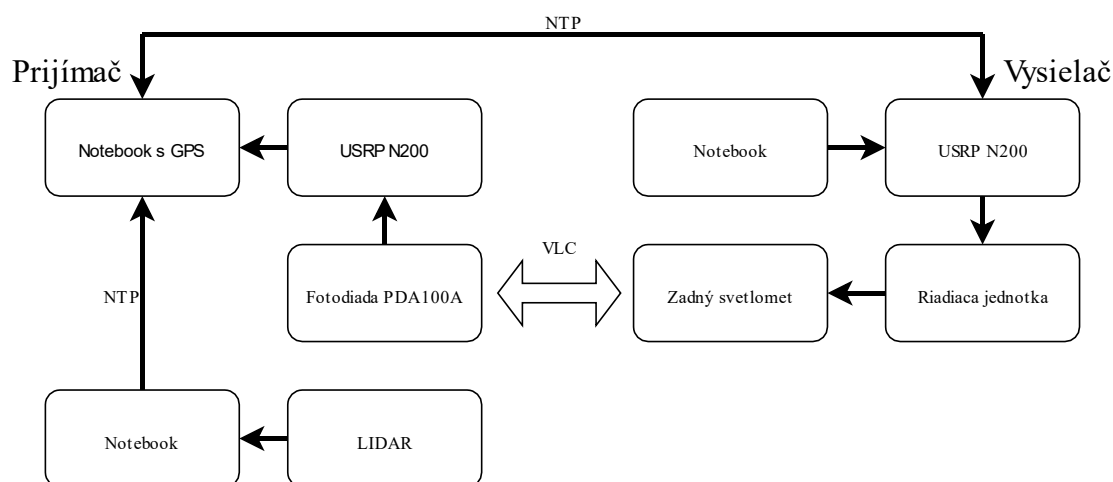
Ako vysielач bol v tomto experimente použitý vyššie uvedený predný automobil so zadným 12 V LED svetlom, umiestneným vo výške 0,87 m nad zemou a s frekvenciou nosiča 300 kHz. Prijímačom bol fotodiódový modul Thorlabs PDA 100A, umiestnený pred nárazníkom druhého automobilu. Jeho detekčná plocha bola 1 cm² (10 mm x 10 mm) so šírkou pásma 860 kHz pri zisku 20 dB. Rovnako ako v prípade vysielача bol prijímač umiestnený vo výške 87 cm nad zemou. Nosná frekvencia vysielача dosahovala 300 kHz a vzorkovacia frekvencia bola nastavená na 200 kHz. Vysielач bol ďalej nastavený pre potreby experimentu - k odbúraniu okolitého rušenia a k eliminácii nelinearity.

Na obrázku 4 pod textom je zachytené finálne nastavenie vysielajúcej LED žiarovky v zadnej časti automobilu a prijímací fotodiódy v rámci experimentu, viz [9]. Za povšimnutie stojí na streche automobilov umiestnenie antény pre realizáciu podporné komunikácie za jazdy prostredníctvom bezdrôtovej siete Wi-Fi.



Obrázok 4 - Nastavenie automobilu pred zahájením experimentu

Ďalší obrázok 5 zobrazuje podrobný blokový opis daného systému vrátane všetkých jeho súčastí. Na strane vysielateľa došlo k nahradeniu štandardných žiaroviek 12 V 1157 LED žiarovkami, avšak ostatné moduly svetiel zostali v pôvodnej podobe zachované, viz [9]. V prvom aute (vysielač) sa ďalej nachádza notebook s potrebným softvérovým vybavením, pričom kľúčový je program pre vytvorenie rádiového signálu ETV a ďalej softvér N200, pomocou ktorého možno ovládať LED žiarovky a upravovať ich jas. Informácie v digitálnej podobe boli z počítača odoslané do USRP, kde došlo ku generovaniu analógového signálu s frekvenciou 200 kHz. Po prijatí informácie v druhom vozidle boli prijaté správy dekodované za použitia fotodiódy Thorlabs PDA100A, dekodovacieho zariadenia USRP N200 a ďalšieho prenosného počítača. Použitý fotodiódový modul obsahuje navyše zosilňovač, ktorý signál upravil do podoby akceptovateľnej pre spracovanie notebookom.



Obrázok 5 - Jednotlivé súčasti systému pre realizáciu experimentu

V rámci experimentu bolo nevyhnutné sa vyvarovať problému s nelineárnym vzťahom medzi vstupným prúdom LED a intenzitou výstupného svetla. Tá by v skúmanom systéme pri signále OFDM mala za následok rušenie medzi subnosnými vlnami, a preto bola výstupná intenzita použitých LED starostlivo meraná a kalibrovaná.

Záverom experimentálneho nastavenia je vhodné bližšie predstaviť a popísať cestu, na ktorej bolo meranie vykonávané. Jednalo sa o Tchao-wanskú diaľnicu č. 3, konkrétne o jej úsek medzi mestami Keelung a Sijhih. Celková vzdialenosť úseku, na ktorom prebiehalo meranie je 18 km a na diaľnici sa na danom rozsahu možno stretnúť so všetkými typickými prvkami - stúpaním, klesaním, zákrutami, tunelmi, zjazdmi, nájazdmi aj križovatkami vyžadujúcimi odbočenie automobilu v ostrom uhle. Ako predné vozidlo, tak aj zadné bolo riadené vôľou vodiča (bez použitia tempomatu) a v nastavení prispôsobenom bežným jazdným podmienkam. Popísaná trasa bolo prejdená celkom šesťkrát pre získanie komplexných dát.

1.2.3.3 Zhodnotenie experimentu

Vykonané skúmanie v reálnom prostredí umožnilo získať nové poznatky o využití VLC komunikácie v reálnej prevádzke a pomohlo identifikovať základné prednosti a nedostatky použitia tejto techniky. V experimente boli sledované predovšetkým dva hlavné aspekty, a teda celkový výkon zariadenia a jeho systémové chyby v súvislosti s výkonom a ďalej aspekty súvisiace s prerušením signálu počas jazdy.

Hlavné poučenie v rámci daného experimentu je fakt, že zistená chyba výkonu je v týchto meraniach konzistentná s hodnotou nameranou pri stacionárnom nastavení. Hlavným faktorom, ktorý potom určuje výkon systému je v tomto prípade pôsobiaca sila, ďalej ovplyvnená vzdialenosťou vysielača a prijímača a tiež uhlom dopadu. Avšak je tiež dôležité povedať, že viacúrovňové šírenie signálu, spôsobené odrazom od okolitých vozidiel a ďalších prvkov v rámci cestnej infraštruktúry nevytváralo počas pozorovania žiadny negatívny dopad na výkonnosť tohto systému.

Vo výsledku tak závery analýzy upozorňujú na fakt, že VLC komunikácia V2V (potenciálne i V2I) dokáže byť aj v reálnom prostredí extrémne stabilná. O tom svedčia kladné poznatky v rámci experimentu, kedy vo veľkom množstve prípadov bol signál medzi prijímačom a vysielačom stabilne spojený a umožňoval súvislý tok balíčkov informácií bez chýb až po dobu 50 sekúnd. Tiež sa pozorovali faktory, ktoré majú vplyv na prerušenie prenosu informácií. Systému by však prospela zmena umiestnenia prijímacieho zariadenia, ktoré počas experimentu bolo v strede vozidla. V situácií kedy sa cudzie vozidlo dostalo medzi vysielač a prijímač auto došlo k rozpadu spojenia. Signál teda nebol zachytávaný ani od jedného z dvoch vysielačov. Prvá možnosť je umiestniť prijímač na okraj automobilu. Druhá varianta by mohla byť tzv. multi hop prenos kedy cudzie auto bude predstavovať smerovač.

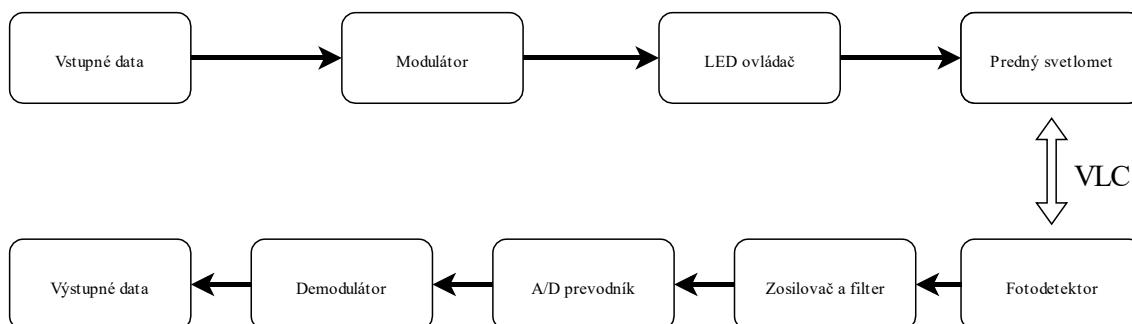
Autori tejto štúdie predpokladajú, že takto získané poznatky by mohli byť ideálnym vstupom, ktorý by bolo možné využiť pri ďalších meraniach.

1.2.4 VLC využívajúce fotodiody - Experiment 2

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade je aj u tohto experimentu pracované s fotodiódou ako s príjemcom vysielané informácie. Výskum bol v tomto prípade realizovaný za spolupráce centra pre výskum a vývoj bezpečnostných prvkov v automobilovej doprave, zaštitený kórejským automobilovým technologickým inštitútom v Daegu a Yeungnam University v kórejskom Gyeongbuku, pričom vedúcimi tohto výskumného tímu boli J. H. Yoo a J. S. Jang. Pri realizácii experimentu bola tentokrát použitá inverzná schéma modulácie 4-PPM, ktoré spĺňalo predpoklad regulácie osvetlenia (jeho zníženiu) o 75% pri danom experimente. Aj s takto obmedzeným svetlom však systém preukázal svoju schopnosť pre použitie VLC komunikáciu v rámci V2V pri prenosovej rýchlosti 10 kb / s na viac ako 30 m vzdialenosti a to za bežných denných časových a svetelných podmienok. Podľa autorov je realizovaný experiment dôležitou súčasťou vývoja v oblasti inteligentných dopravných systémov.

1.2.4.1 Systémový model

Obrázok 6 pod textom zachytáva experimentálne nastavenie vysielača a prijímača v rámci daného pokusu pri V2V komunikácii. Podobne ako v predchádzajúcom prípade boli v prvej fáze vstupné dáta modulátorom prevedené do požadovaného formátu a následne odovzdané LED svetlu pre bezdrôtový prenos. Po prijatí týchto dát fotodetektorom na strane prijímača došlo k spätnej transformácii informácií pasívnym prijímačom a následne A / D konvertorom. Demodulované dáta získali opäť požadovaný výstupný tvar, ktorý umožňuje ich ďalšiu analýzu.



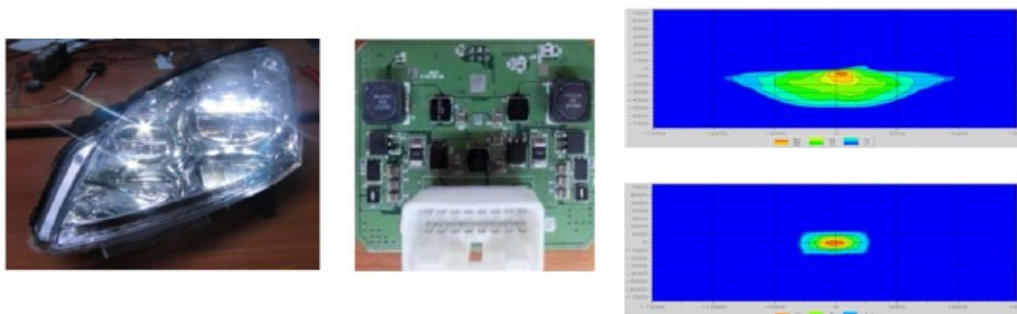
Obrázok 6 - Nastavenie systému s LED fotodiodou

Ako už bolo uvedené v úvodnom opise, ako aj v rámci experimentu bolo použité inverzný schéma pulzná modulácia polohy I-M-PPM. Táto technika podporuje ako riadenie stmievania zo strany užívateľa tak i zlepšuje podmienky pre vizuálny prenos dát. Inverzný PPM totiž dosahuje pri prenose dát vyššej rýchlosti ako variabilné modulácie pulzné polohy (VPPM). Pre experiment bola použitá 75 % intenzita svetlometu pri konkrétnej schéme 4-PPM.

1.2.4.2 Experimentálne nastavenie

Pre korektné popísanie celého experimentu je opäť vhodné popísať a charakterizovať všetky jeho súčasti, ktoré majú vplyv na výstup daného merania.

Kľúčovou súčasťou systému na strane vysielateľa boli LED svetlomety a LED modul riadiacej jednotky. Pre vysielanie VLC signálu zo svetlometov boli použité komerčné prototypové LED svetlomety, navrhnuté Renault Samsung Motors a vyvíjané Nissanom, navrhnuté pre automobil Renault Samsung QM5, v Česku známy ako Renault Koleos. Tieto svetlomety boli použité cielene, pretože vyhovujú požiadavkám na reguláciu rozloženie svetla z hľadiska vyžarovania. Napriek tomu sú do istej miery prenastavené a navrhnuté tak, aby poskytovali o 25% vyššiu intenzitu, ako je požadované podľa kritérií distribúcie svetla. Oba vyššie popísané systémy, teda LED svetlomety a modul riadiacej jednotky sú zachytené na obrázku 7 pod textom. Na obrázku je ďalej graficky zobrazená distribúcia osvetlenia LED svetlometu pri použití stretávacích svetiel a diaľkových svetiel. Nastavenie systému zodpovedá výskumu pri bežnej VLC komunikácii za denného svetla a tomu zodpovedajúcich svetelných podmienok.



Obrázok 7 - LED svetlomety, riadiaca jednotka a distribúcia osvetlenia

Rovnako ako stranu vysielačieho zariadenia je vhodné predstaviť a okomentovať tiež stranu zaisťujúcu príjem signálu a jej jednotlivé súčasti. V súvislosti s tým ukazuje obrázok 8 pod textom prototyp prijímača a jeho prvky, ktoré boli použité počas demonštrácie, viz [11]. Na snímke je zachytený fotodetekovací modul, ktorý pozostáva z fotodiódy, clony, šošovky a farebného filtra. Ten má dva fotomoduly, pričom jeden disponuje šošovkou s objektívom a druhý je bez šošovky. Spodná časť systému so šošovkou bola použitá počas experimentu (červeným zvýraznená oblasť). Počas snímania optického signálu bola optická šošovka a clona inštalovaná na fotodiódu, čo viedlo k predĺženiu komunikačnej vzdialenosti. Na obrázku 8 je ďalej znázornený modul pre spracovanie zachyteného signálu a grafická podoba nameraného prijatého signálu po prechode optickým filtrom a PD, viz [11].



Obrázok 8 - Fotodetekovací modul,

Pri realizácii experimentu bol systém vystavený bežným podmienkam v exteriéri. Slnko bolo odchýlené od prijímača približne v uhle 30° a vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom bola postupne upravovaná. Predvolené vzdialenosti oboch zariadení bolo 5 m a počas experimentu sa zvyšovala v 5 m intervaloch až na konečných 40 m. Frekvencia vysielača bola nastavená na 20 kHz.

1.2.4.3 Zhodnotenie experimentu

V rámci sledovaného experimentu bol demonštrovaný systém V2V komunikácie za využitia technológie VLC, pričom na strane vysielača boli použité LED svetlomety a na strane prijímača fotodióda. Systém na rozdiel od iných experimentov využíval inverzný schéma 4-PPM, ktorý reguloval rozloženie svetla v systéme na základe jeho stmievania vo výške 75%. Získaná výsledná rýchlosť dosiahla 10 kb / s pri 20 kHz. Do prijímacieho zariadenia bol implementovaný farebný filter za účelom zabránenia optickému rušeniu a v dôsledku slnečného žiarenia či iných optických a svetelných zdrojov. Pre zlepšenie komunikačnej vzdialenosti bol systém ďalej doplnený šošovkou s objektívom a clonou. Systém preukázal schopnosť VLC komunikácie v dennej dobe pri bitovej chybovosti BER 10^{-5} na komunikačnej vzdialenosti viac ako 30 m.

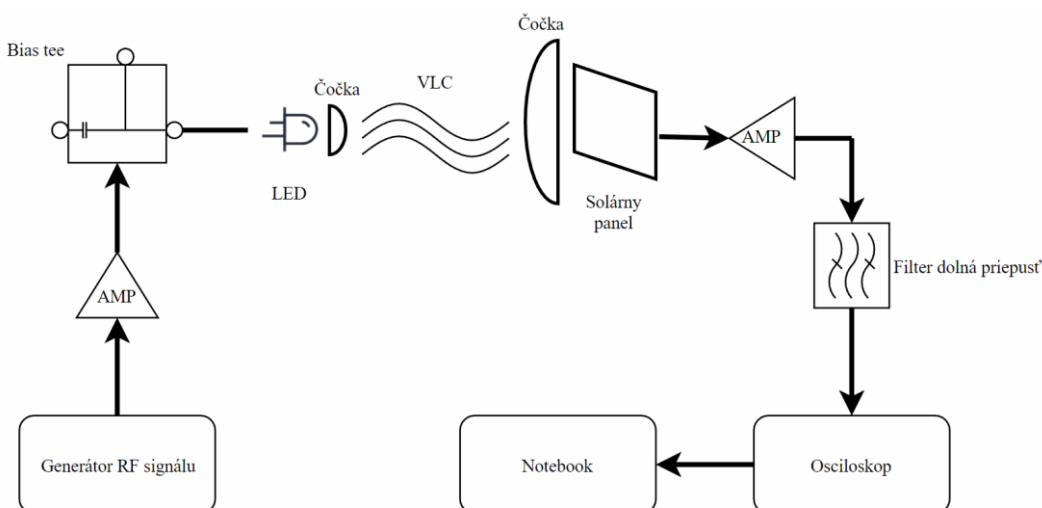
Ako bolo už skôr v experimente uvedené, systém je schopný prenášať signál pri rýchlosti 10 kb / s. Prírodné podmienky a prostredie, ktoré sprevádzali realizáciu daného experimentu, zodpovedajú bežnému pracovnému prostrediu, v ktorom by mal systém v praxi fungovať. Na základe tejto skutočnosti je tak možné povedať, že VLC systémy dokazujú možnosť aplikácie daného riešenia v budúcnosti pre zaistenie V2V komunikácie, kde by zvlášť efektívny systém mohol byť implementovaný do IDS a aktívnych bezpečnostných systémov.

Pri realizácii daného experimentu bolo zistené, že použitie V2V komunikácie v rámci VLC má schopnosť vnímať a rozpoznávať prekážky. Ak existuje prekážka na ceste medzi vysielateľom a prijímačom, systém ju zaregistruje a označí ju ako čierny blok. Tento blok potom na strane prijímača ukazuje, že prechod dát je znemožnený v dôsledku týchto prekážok systém vyžaduje odblokovanie tohto vizuálneho komunikačného kanála. Avšak vzhľadom na to, že doba pre obnovenie príjmu dát po vzniknutom blokovaní je veľmi krátka (výrazne kratšia ako doba blokovania), tak je možné ju považovať za zanedbateľnú a nie je potrebné parametre merania upravovať.

1.2.5 VLC využívajúce solárneho panelu

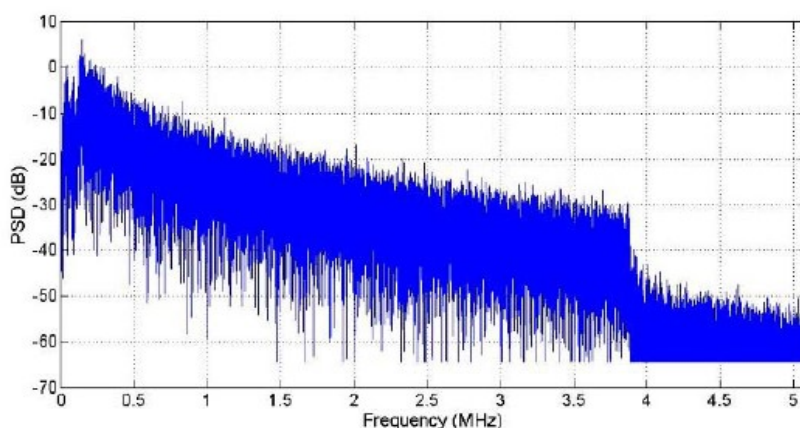
Vcelku alternatívnym prístupom je využitie solárneho panelu ako fotodetektora pre zaistenie VLC, kedy je pasívny príjem optického signálu transformovaný na signál elektrický, ktorý je už možné ku komunikácii V2V aplikovať. V rámci experimentu, ktorý bol realizovaný Dr. Rohail Sarwar a kol. na Zhejiang University vo východnej Číne, bol použitý ako pasívny detektor malý solárny panel o rozmere 25 mm x 30 mm za účelom detekcie optického signálu. Na strane vysielateľa bola proti tomu využitá modrá dióda s výkonom 3 W. Ďalej je vhodné uviesť, že pri realizácii experimentu tento prijímač vyžadoval externý zdroj napájania, viz [8].

Pri realizácii daného experimentu bolo nevyhnutné zabezpečiť adekvátne programové a technické vybavenie pre daný experiment vzhľadom na skúšanie úplne novej technológie. OFDM signály boli generované pomocou programu Matlab a získané výstupy boli zosilnené pomocou zosilovača. Zosilnený OFDM signál bol privedený na modrú LED. Ďalej bola v samotnom jadre experimentu medzi LED a solárnym panelom umiestnená dvojica zaostrovacích šošoviek. Po prijatí signálu bolo nutné signál zosilniť pomocou iného zosilovača, lebo takto zosilnené signály mohli prejsť cez filter LPF, ktorého zámerom bolo blokovat' vysokofrekvenčné signály. Na záver došlo k zachyteniu vln prijatých signálov, ktoré boli prenesené do počítača pre vyhodnotenie. Celý tento systém je znázornený na obrázku 9 pod textom, viz [8].



Obrázok 9 - Nastavenie systému so solárnym panelom,

Za použitie OFDM so 16-kvadraturovou moduláciou amplitúdy (teda 16-QAM) bola v experimente dosiahnutá prenosová rýchlosť vo výške 15,03 Mbps pri bitovej chybovosti (BER) vo výške $1,6883 \times 10^{-3}$, a to na vzdialenosti 2 metre. Ďalej je vhodné uviesť, že amplitúda nadobudla pri meraní maximálneho rozsahu 126,9 mV. Rozsah zachyteného spektra pri realizácii experimentu (16-QAM, 2 m) je znázornený na obrázku 10 pod textom, v ktorom os "x" predstavuje frekvenciu vyjadrenú v MHz a os "y" ukazuje hodnotu výkonovej spektrálnej hustoty v dB, viz [8].



Obrázok 10 - Rozsah zachyteného spektra pri realizácii experimentu

V rámci vykonaného experimentu bol preukázaný potenciál VLC komunikácie vykonanej pomocou nízkoenergetického solárneho panelu ako prijímača. Značnou výhodou je predovšetkým úspornosť a ekologickosť daného systému oproti iným formám VLC komunikácie. Hoci sa nedá očakávať masívna obľúba tohto systému v prostredí V2V či

všeobecnejšie V2X komunikácie, tak by mohli byť nájdené oblasti, v ktorých by skúmané riešenie bolo optimálne.

1.2.6 Sumarizácia testov

Z hľadiska infraštruktúry sa stali LED diódy najviac využívané zdroje svetla na osvetľovanie a signalizáciu v doprave. Pri budovaní VLC infraštruktúry je potrebné brať do úvahy stávajúce prvky dopravy ako sú napríklad semaforey. Tie majú svoju geometriu, polohu, vyžarovaciu charakteristiku. Cielom je implementovať VLC bez nutnosti prestavby dopravnej infraštruktúry. Toto vzali do úvahy It Ee Lee, Navin Kumar a Alin-m. Cailean ktorý spravili simuláciu V2I s rozdielnymi vstupnými parametrami [30-32]. Simulácia bola neskôr testovaná pre poveternostne podmienky, viz kapitola 3.2. Tam sa preukázalo, že zdroj žiarenia o červenej vlnovej dĺžke má najnižší koeficient útlmu pre vonkajšie prostredie. Existuje totiž vzťah (rozptyly) medzi vlnovou dĺžkou a molekulami plynu, vody, oxidom uhličitým a podobne. Taktiež vzali do úvahy pozíciu semafora ako vysielача. Auto prijímalo signál za pomoci lacného fotodetektoru. Fotodetektor prijímal signál vo forme optického žiarenia a premieňal ich na elektrický prúd. Test VLC bol realizovaný za rôznych vzdialenostiach a rozdielných jednoduchých moduláciách ako je OOK a DSSS SIK rádiová modulácia. Teoretická vzdialenosť pri priamej viditeľnosti by mala byť približne 58,3 m a dosahovať rýchlosť 100 kbps [30]. Vo VLC vzniká interferencia medzi užitočným signálom a šumom zo slnka popri prípade iné zdroje LED v okolí. K potlačeniu týchto interferencií je možné zredukovať pomocou linkového kódu Manchester alebo Miler [31]. V tomto prípade bol test vykonaný na vzdialenosti 20 m ako spoľahlivý. Vyžarovacím uhlom semaforu však nie je možné pokryť všetky vozidlá nachádzajúce sa na ceste. Z toho dôvodu sa tiež uvažuje o V2V komunikácii ako o smerovači ktoré prenesú data vozidlám, ktoré sú mimo dosahu semafora.

Nové auta disponujú prevažne LED svetlami ktoré je tiež možné využiť pre komunikáciu. Či už ide o predný svetlomet alebo zadný tak každá funkcia musí spĺňať určitú normu intenzity. Ich definícia pozostáva z minimálnej intenzity na marginálnych bodoch. Tieto body sa dajú predstaviť ako intenzita svetla v jednotlivých vyžarovacích uhloch svetelnej funkcie. Tieto hodnoty sa merajú pomocou goniofotometra a sú viazané legislatívou ECE pre Európsky trh. Legislatíva hovorí o minimálnom a maximálnom svetlome toku pre každú svetelnú funkciu svetlometu. Rozloženie týchto bodov tiež kontroluje FOV funkcie a teda jej vyžarovacie uhly. S intenzitou totiž stúpa dosiahnuteľná vzdialenosť medzi zdrojom a detektorom. Toto však predstavuje intenzitný interval pre komunikáciu V2V, ktorý môže byť podrobený hľadaním najlepších vstupných parametrov.

Z testovania, prípadne optických simulácií predných svetlometov dosiahli výsledky na 50 m prenosovú rýchlosť 10 kbps [34]. To bolo možné vďaka zložitejšej modulácii 4 PPM ako je OOK modulácia. Tá predstavuje spoľahlivé LOS spojenie na 20 m pri použití OOK [33]. Oba tieto experimenty boli realizované za pomoci PIN fotodiódy. Tak isto v článku [38] bola otestovaná na vzdialenosti 15 m a FSK modulácia ktorá dosiahla rýchlosť 3,5 Mbps.

O trochu širším testovaním prešla komunikácia za pomoci červených LED, ktoré sa nachádzali na LED paneli alebo ako zadné denné svietenie auta. Z počtu týchto experimentov však nie je možné povedať, ktorá modulácia by mohla byť štandardizovaná pre VLC v automotive. Avšak už vyššie spomenutý experiment ktorý používa OFDM techniku dosiahol zaujímavý dosah 45 m. Spojením PWM a OFDM dosiahli prenosovú rýchlosť 45-55 Mbps s využitím fotodiódy Thorlabs PDA100A (10 mm x 10 mm). Dobré je pripomenúť, že ide o zadné denné svietenie reálneho svetlometu auta. Podobnú prenosovú rýchlosť dosiahol experiment, ktorý tiež využíval OFDM. Ten využíval ako prijímacie zariadenie OCI kameru s detekciou obrazu a ako vysielateľ LED panel s využitím 4-256 QAM. Veľkým negatívom je vzdialenosť 1,5m na ktorej bol test vykonaný. Porovnanie týchto dvoch experimentov zaoberajúce sa komunikáciou v červenej oblasti sú zobrazené v tabuľke 1.2.

Tabuľka 1.2: *Sumarizacia experimetov*

Rok	Hlavný autor	Zdroj	Vzdialenosť	Detektor	Typ modulácie	Prenosová rýchlosť
2016	Wen-Hsuan Shen [9]	Zadné svetlo 1157 (12 V, červená LED)	45 m	Fotodióda Thorlabs PDA100A (10 mm x 10 mm)	PWM (OFDM)	45 – 55 Mbps
2016	Yuki Goto [2]	Systém červených LED (4 x 5; 0,72 V, 14,5 MHz)	1,5 m	OCI kamera (oh. vzdálenosť objektívu 50 mm)	4 - 256 QAM (OFDM)	45 Mbps, 50 Mbps, 55 Mbps
2014	Isamu Takai [10]	Systém červených LED (10 x 10; 4 W, 55 MHz)	7,78 m	Vysokorychlostní kamera (oh. Vzdálenosť objektívu 12,5 mm)	Pulse Width modulation (PWM)	10 Mbps
2014	Takaya Yamazato [11]	Systém červených LED (32 x 32)	45 m	Vysokorychlostní kamera (CMOS senzor)	Pulse Width modulation (PWM)	10 Mbps
2016	Yoshihito Imai [12]	Červená LED (OS5RKA5B61P)	1-8 m	Vysokorychlostní kamera XCG-V60E, SONY (oh. Vzdálenosť objektívu 8-48 mm)	Pulse Width modulation (PWM)	84 bps
2017	Takaya Yamazato [13]	Systém červených LED (32 x 32)	30-70 m	Vysokorychlostní obrazový senzor a OCI senzor	Pulse Width modulation (PWM)	55 Mbps

Ako aj medzi autami tak aj v infraštruktúre je dobré zvážiť aký typ senzora je vhodné implementovať do dopravy. Kamera ako prijímač disponuje výhodami oproti fotodiódam a zase naopak. Kamera je dnes štandardne výbavou automobilov a je možné ju použiť aj ako detektor

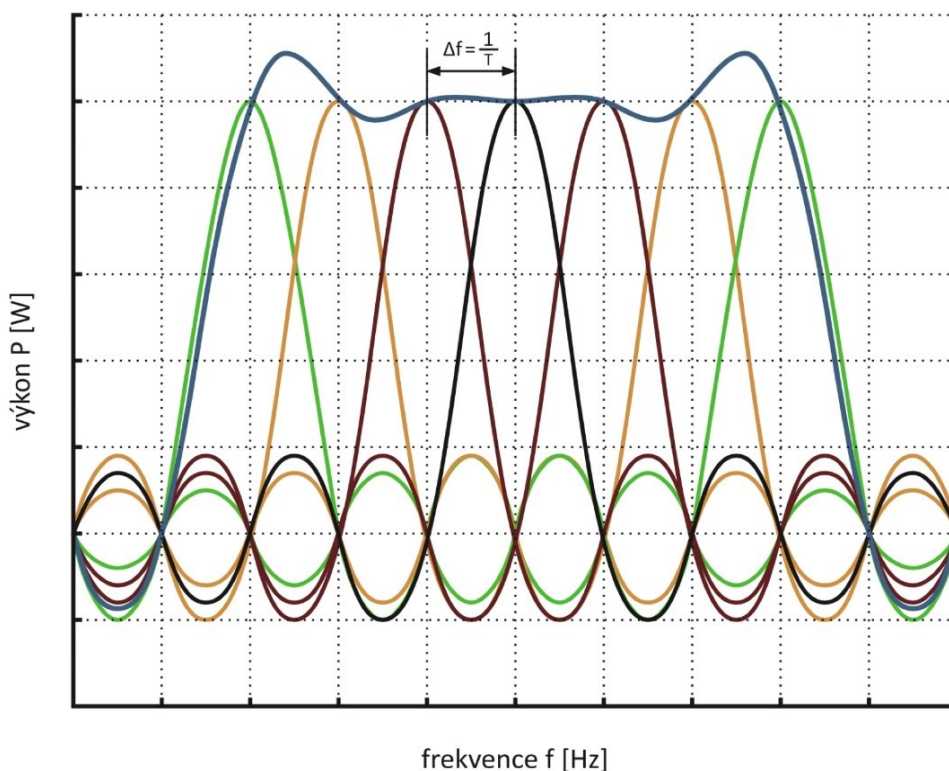
objektov ako napríklad značky, chodci a iné. To isté platí aj pre kamery v infraštruktúre. Kamery v terajšej doprave nie je možné použiť na detekciu optického signálu, takže by bola potrebná náhrada. V tabuľke sú zapísane experimenty skúmajúce kameru ako prijímač (10,37-40). Táto komunikácia je o trochu mladšia. Vysokorýchlostná kamera však predstavuje väčšiu finančnú náročnosť na obstaranie ako PIN. Existujú tiež lavínové fotodiódy ktoré predstavujú alternatívu vo voľbe prijímača. Sú citlivejšie ako PIN, ale sú zároveň aj citlivejšie na šum a iné LED zdroje. Veľkou nevýhodou je však cena a spotreba energie.

2 Základy OFDM

Táto kapitola sa zaoberá systémami, ktoré využívajú pre prenos dát viac subnosných kanálov, pričom podrobne popíšem princíp fungovania systému OFDM. Modulácia s viacerými nosnými kanálmi je známa už od 50. rokov 20. storočia. Jeho masívne využitie však prišlo až vďaka vývoju číslicovej techniky a to predovšetkým signálových procesorov DSP (Digital Signal Processor) a hradlových polí FPGA (Field Programmable Gate Array). Vďaka tomu si OFDM našlo svoje uplatnenie ako v bezdrôtových sieťach tak aj systéme digitálnej televízie[12].

2.1 Základný princíp OFDM

Podstata OFDM spočíva v efektívnom využití daného spektra kedy šírku spektra rozdelíme na menšie subnosné kmitočty a toto dostupné kmitočtové spektrum sa javí ako celok. Oproti jeho predchodcovi FDM sa OFDM snaží lepšie využívať danú šírku spektra tým, že znižuje medzery medzi jednotlivými subkanálmi. Medzeru medzi kanálmi volí tak aby boli navzájom ortogonálne čo znamená že maximum každého kanálu sa nachádza v minime susedných subkanálov. Grafické znázornenie technológie OFDM je znázornené na obrázku 11[7].



Obrázok 11 - Spektrum OFDM signálu

Na obrázku pre zjednodušenie predstavy je možné vidieť 7 spektier subkanálov (čierna, zelená, žltá) a súčet výsledných spektra (modrá). Majme danú šírku pásma B ktorú chceme rozdeliť na N nosných kmitočtov. Šírka každého kmitočtu Δf je potom daná:

$$\Delta f = B/N \quad (2.1)$$

Keďže už poznáme frekvenčnú šírku jedného subkanálu môžeme zo všeobecne známeho vzorca:

$$\Delta f = 1/T \quad (2.2)$$

Vypočítať dĺžku trvania jedného OFDM symbolu.

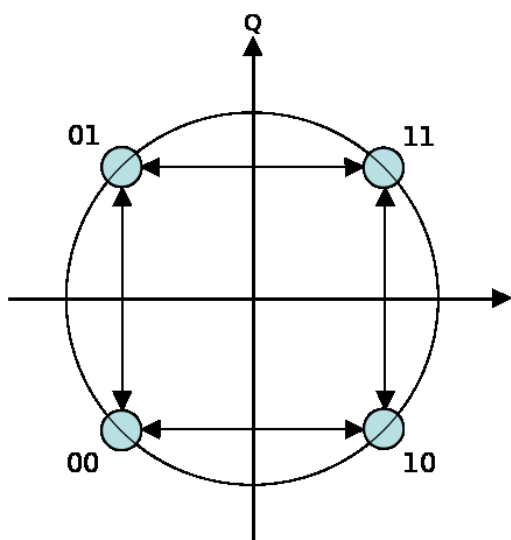
2.2 OFDM modulátor

Signal OFDM môžeme v časovej oblasti zapísať nasledujúcou rovnicou:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} A_{m,n} \text{Rect}_T(t - nT) e^{j2\pi m \frac{t}{T}} \quad (2.3)$$

Kde m je číslo subkanálu a n poradie symbolu tzn. že $A_{m,n}$ je n -tý prvok na m -tom subnosnom kanále. Pri získaní všetkých $A_{m,n}$ získaváme kompletnú informáciu. Ďalším v rade je funkcia Rect_T , ktorá určuje dobu trvania jedného OFDM symbolu[12].

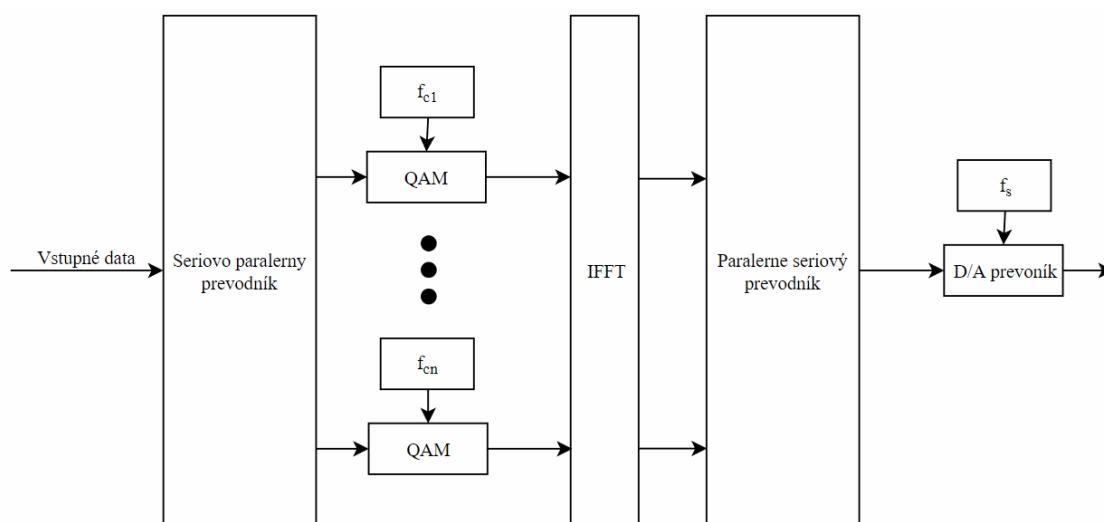
Máme dáta, ktoré predstavujú sériovú postupnosť „0“ a „1“. Tie môžu byť obohatené o redundantné dáta konvolučným kódom kvôli zníženiu chybovosti resp. opravy dát. Takýto tok dát prevedieme na seriovo-paralelný prevodník. Tam je sériový tok pretransformovaný na N paralelných skupín, kde jedna skupina predstavuje jeden OFDM subkanál. Závislosti od použitej modulácie škáluje tento sériový tok na potrebný počet bitov pre mapovanie. Príkladom je 4-QAM ktorý predstavuje v konvolučnom diagrame 4 možné stavy mapovania 0 a 1, kde podľa diagramu môžu nastať 4 rôzne stavy, ktoré sú vyjadrené v komplexnom čísle. Obrázok 12 graficky znázorňuje konstelačný diagram typu 4-QAM.



Obrázok 12 - Konstelačný diagram 4-QAM

Máme teda za sebou tzv. mapovanie a bitom priradené jednotlivé stavy, ktoré sú vyjadrené komplexným číslom pre jednotlivé subkanály. Teraz je potrebné použiť IFFT (inverzná rýchla fourierova transformácia) kedy signál preložíme v frekvenčnej oblasti do časovej oblasti.

OFDM signál je obecné komplexný a takto spracované dáta predstavujú komplexnú postupnosť a IFFT obdrží tzv. nesymetrický vstup. Tu sa však môže využiť vlastnosť symetrickosti fourierovej transformácie tak aby bol výsledok čisto reálny. Teda z X prijatých komplexných čísel vypočíta $2X$ vzorcov reálnych OFDM symbolu. Takto vyzerá blokové schéma OFDM modulátora, viz [12].

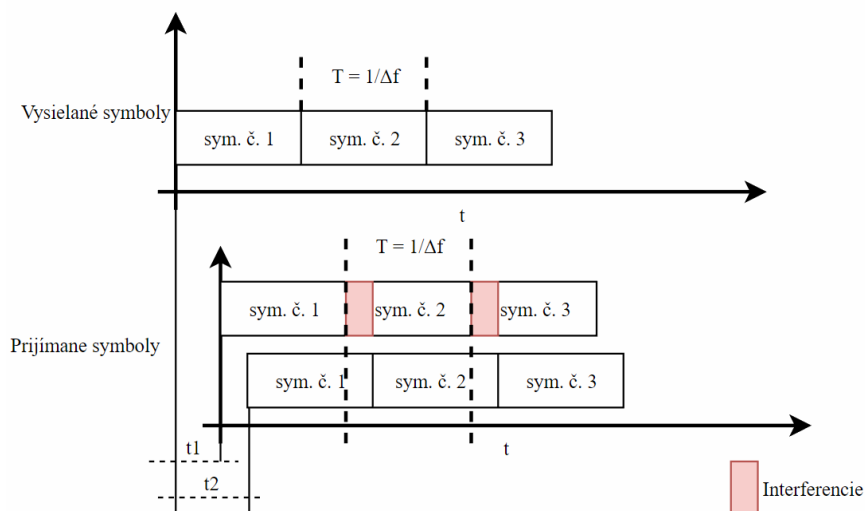


Obrázok 13 - Bloková schéma OFDM modulátora

Nevýhoda takéhoto analógového modulátora je nutnosť využiť dvojnásobku nosných kmitočtov oproti digitálnej modulácie. Tá pracuje s komplexným číslom. Takto spracované paralelné dáta je opäť potrebné previesť pomocou paralelne sériového prevodníku späť na sériový tok dát a D/A prevodníkom na signál určený pre vysielač. U demodulátora je tento proces inverzný.

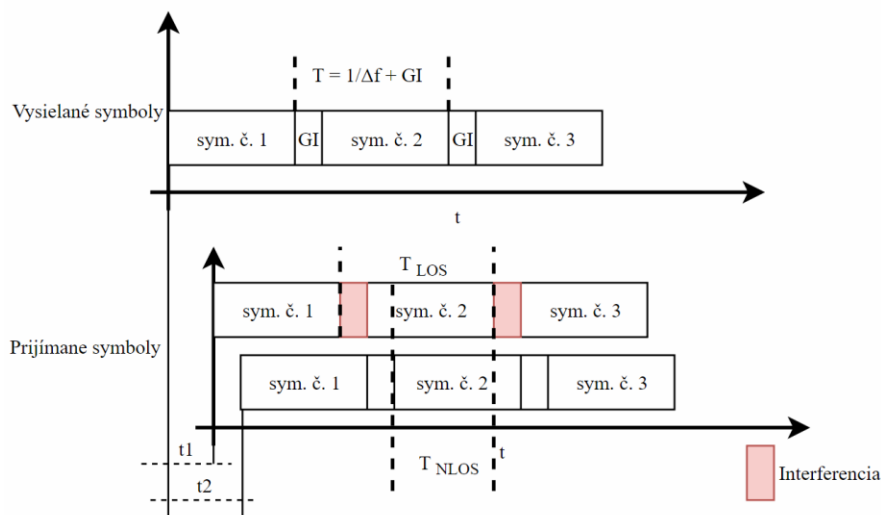
2.3 Potlačenie viaccestného šírenia

Viaccestné šírenie je problém týkajúci sa hlavne rádiových sietí. Signál vysielaný za pomoci antény je všesmerový a k prijímaču sa môže dostať priamou viditeľnosťou (LOS) ale aj rôznymi odrazmi (NLOS) napr. od povrchu zeme, čo má za následok, že na prijímacej strane dorazí OFDM symbol vo viacerých časoch a teda môže ovplyvniť symbol nasledujúci poňom, ktorý sa už nachádza na prijímači. Pre lepšie pochopenie je obrázok 14 nachádzajúci sa pod textom.



Obrázok 14 - Príklad interferencie

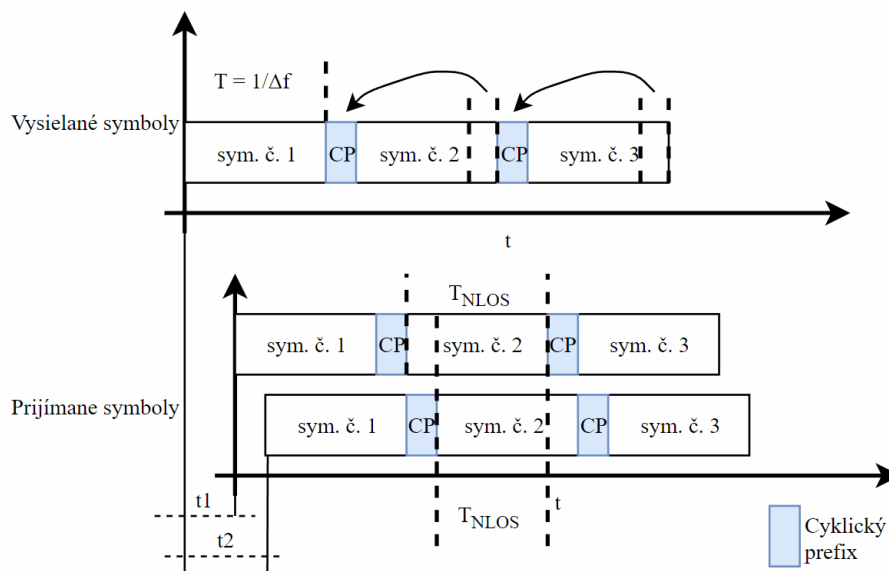
Obrázok popisuje medzisymbolovú interferenciu (Inter Symbol Interference -ISI) kde môžete vidieť v akom čase je signál vyslaný. Na prijímacej strane signál dorazí pri priamej viditeľnosti o oneskorenie t_1 a pri šírení odrazom o t_2 . To má za následok ISI. Prvým možným riešením ISI je pridanie tzv. ochranného intervalu (GI, Guard Interval) medzi jednotlivými OFDM symbolmi. Princíp je jednoduchý. Behom doby TGI sa nevysiela žiaden symbol takže prijímač má dostatok času na príjem symbolu, ktorý prichádza na prijímač odrazom. Obrázok 15 popisuje túto metódu.



Obrázok 15 - Ochranný interval

Táto ochrana však dokáže chrániť proti symbolovej interferencii nie však proti medzikanálovej interferencii (ICI, Inter Channel Interference). Lepšou možnosťou je využitie

cyklickej predpony CP. Tá spočíva v skopírovaní koncovkej časti vysielaného symbolu na jeho začiatok. NLOS symbol tak bude zase spadať do ochranného intervalu. Týmto sa predchádza neúplnému integračnému intervalu príjmu oneskoreného symbolu, čo zlepšuje ortogonalitu a zabráňuje tým aj ICI pre ktorú je dôležitá synchronizovanosť a ortogonalita jednotlivých subkanálov. Obrázok 16 popisuje túto metódu.



Obrázok 16 - Cyklický prefix

Dĺžka GI a CP musí presahovať dĺžku impulzu odozvy kanálu. Nevýhodou týchto prístupov je vedome znižovanie prenosovej rýchlosti.

2.4 Sumarizácia

Medzi najväčšie výhody systému s viacej nosnými kanálmi patrí ich spektrálna účinnosť. Tá udáva do vzťahu prenosovú rýchlosť a šírku kmitočtového pásma. Ďalšia výhoda je zníženie modulačnej rýchlosti za predpokladu tej istej prenosovej rýchlosti oproti FDM a predĺžiť tak dobu trvania symbolového stavu. To napomáha aj obmedzeniu ISI. OFDM nemá len výhody. U OFDM je dôležitá ortogonalita medzi jednotlivými kanálmi, čo pridáva tomuto systému vyššie nároky na DSP, zosilňovač, D/A prevodník, A/D prevodník a algoritmy pre FFT a IFFT. V prípade, že vzdialenosť medzi jednotlivými kanálmi bude kolísť (jitter) dôjde ku vzniku ISI a ICI.

3 Vplyv atmosférických javov

Potreba po bezdrôtovej komunikácii stále rastie. Ide o moderný trend ktorý poskytuje lepší komfort pri komunikácii medzi zariadeniami. Rádiové vlny sú však v dnešnej dobe pomerne vyťažené a s rastúcim dopytom nebude možné tieto potreby pokryť. Rozdelené rádiové frekvencie prispievajú k elektromagnetickému znečisteniu prostredia a nemožnosť túto technológiu využiť napríklad v častiach nemocnice, leteckve, petrochemických závodoch a ponoriek v dôsledku rušenia [13,14].

Vedci preto začali riešiť iné možnosti bezdrôtovej komunikácie. Dobrý príkladom je všade známa Wi-fi, ktorá sa používa ako bezdrôtový prístup do internetu na krátku vzdialenosť. Tu je možné zameniť za technológiu VLC známu ako Li-Fi. Jeden z prvých ktorý predstavili takéto využitie boli kolegovia na Keio univerzite v Japonsku v roku 2003. Li-fi spadá pod vnútornú komunikáciu, ktorá sa nachádza v miestnosti.

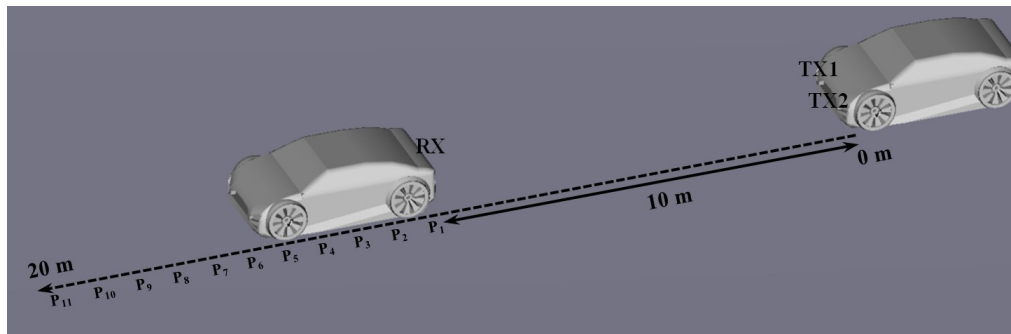
Komunikácia vo viditeľnom svetle (VLC) našla svoje uplatnenie aj vo vonkajšom prostredí. Svoj potenciál preukázala v inteligentnom dopravnom systéme (IDS). Kedy za pomoci svetla dokáže komunikovať V2V, V2I. Zatiaľ čo VLC bola študovaná pre vnútornú komunikáciu [15,16] jeho použitie pre automobilový priemysel je relatívne nové, viz [13,17,18]. Implementácia dodatočného zariadenia do infraštruktúry a vozidiel musí byť dostatočne komplexná. Nestretáva sa iba s problémom nepriamej viditeľnosti (NLOS) ale aj s atmosférickými podmienkami prostredia kde sa kanál uskutočňuje. Nepriaznivé poveternostne podmienky ako je dážď, hmla, sneh, piesočná búrka majú negatívny vplyv na úroveň prijímaného signálu. Ďalším problémom môže byť aj samotná vozovka na ktorej sa auto nachádza. Môže spôsobovať NLOS príjem signálu, ktorého oneskorenie závisí od fyzického stavu cesty a jej odrazivosti. Niečo takéto študoval Lee a kol.[19], ktorý skúmali vplyv oneskoreného signálu, ktorý sa odráža od vozovky.

Z menovaných atmosférických podmienok predstavuje však hmla najväčší problém. Hmla je totiž druh pary, ktorý sa skladá z malých kvapiek vody. Aj keď je veľkosť týchto kvapiek v priemere niekoľko mikrometrov, dokáže úplne narušiť komunikačný kanál prostredníctvom absorpcie, rozptylu a odrazu v prostredí. Hmla a dážď sú teda najmenej priaznivé vplyvy ktoré sa môžu objaviť na cestách, viz [20-22].

Štúdie zaoberajúce poveternostnými podmienkami na VLC pristupujú rôznymi spôsobmi simulácie. Meranie a testovanie VLC v reálnych podmienkach by bolo veľmi zdĺhavé a náročne preto sa vedci snažia rôznymi metódami poveternostne podmienky simulovať.

3.1 Efekt hmly a dažďu na VLC v programovej simulácii

Veľmi zaujímavý experimentom bola simulácia profesora Mohammed Elamassie a kol. na univerzite v Turecku. S využitím simulačného prostredia Zemax vytvorili 3D model situácie VLC zobrazenej na obrázku 17, viz [42].



Obrázok 17 - 3D model v programe Zemax

Auto (RX) predstavuje prijímač a auto za nim dva zdroje ktoré sú v prvotnej fázy od seba vzdialene 10 m. Zemax umožňuje priradenie materiálu, reflexie, index lomu a iné parametre jednotlivým objektom. Autám bol priradený čierny lesklý povrch ktorý ma prezentovať lak reálneho auta. Podľa špecifikácie medzinárodnej komisie (CIE 22) sa predpokladá typ vozovky R2. Zdroj žiarenia bol svetlomet Philips Luseon Rebel Automotive White LED. Pre prijímač bol použitý fotodetektor (PD) umiestnený na zadnej časti auta vo veľkosti 1cm². Jeho zorné pole (FVO) je 180°.

3.1.1 Simulácia prostredia

Aby bolo možné simulovať hmlu a dažď v takomto prostredí je tiež nutné upraviť FSO medzi dvoma autami. K tomu využili Mieov rozptyl, ktorý vo vonkajšom prostredí simulujú ako zmenu indexu lomu, veľkosť častíc a ich hustotu. Pre každý poveternostný vplyv boli stanovené dané parametre zobrazene v tabuľke 1.3.

Tabuľka 1.3: Parametre pre poveternostné podmienky

	Index lomu	Veľkosť (μm)	Hustota(cm ⁻³)
Jasno	1.000277	10-4	1019
Dážd	1.33	100	0.1
Hmla V=50 m	1.33	10	124.6
Hmla V=10 m	1.33	10	622.6

Zemax funguje ako trasovač lúčov kedy simuluje vyžarovaciu charakteristiku daného svetlometu a následne sleduje ich charakteristiku v daných okamihoch. Vyžiarené lúče sa teda stretávajú s podmienkami vonkajšieho prostredia kde sa lámu, odrážajú a interferujú. Dáta (lúče) sú zachytávané na PD. Takto získané dáta sú importované do programu Matlab pre získanie impulzovej charakteristiky (CIR) prenosového kanálu.

3.1.2 Výpočty

K získavaniu CIR bol prevádzaný tzv. sledovanie lúčov (ray tracing) na vzdialenosti 10 m s krokom 1 m od seba. Cieľom bolo nájsť maximálnu možnú vzdialenosť za daných podmienok pri zachovaní chybovosti BER 10^{-6} . Informácie slúžili k získaniu poklesu výkonovej úrovni na prijímači v závislosti na vzdialenosti. To slúžilo k získaniu ekvalizovaných premenných pre výpočet útlmu. Pomocné premenné sú zobrazené v tabuľke 1.4.

Tabuľka 1.4: *Koeficienty pre dané prostredia*

	A	B
Jasno	-0.44	-40.93
Dážd	-0.46	-40.90
Hmla V=50 m	-0.61	-40.46
Hmla V=10 m	-1.2	-40.38

Potom je zníženie hustoty výkonu dané:

$$h = 10^{\frac{Ad+B}{10}} \quad (3.1)$$

kde h je koeficient útlmu pre dané prostredie a vzdialenosť.

Uvažuje sa o signále jednej nosnej vlny kedy je použitá PAM modulácia s rozdielnymi konštelačnými diagramy o veľkosti M . Pre presnejšie výsledky je tiež potrebné vložiť šum AWGN ktorého spektrálna hustota N_0 je nastavená na 10^{-22} A/W. Citlivosť na detektora je 0.28 A/W (30). Výkon každej lampy je $P_t = 10$ dBm. Vzorkovací interval $T_s = 1$ msec. Hľadala sa chybovosť $BER_{target} = 10^{-6}$. Takto aproximovaný prenosový kanál môže vypočítať maximálnu prijateľnú vzdialenosť d pre komunikáciu. Daná:

$$d \approx \left(\frac{1}{A}\right) \left(10 \log_{10} \left(\left((M-1) \sqrt{\frac{N_0}{(rP_t)^2 T_s}} \right) Q^{-1} \left(\frac{BER_{target} M \log_2(M)}{2(M-1)} \right) \right) - B \right) \quad (3.2)$$

3.1.3 Sumarizácia

Takto riešená simulácia VLC a vplyv poveternostných podmienok je celku praktická. Ako už bolo vyššie spomenuté vplyv hmly sa preukázal ako najhorší efekt na VLC komunikáciu. Pri tomto meraní sa využil prenosový kanál jednej nosnej s pulznou amplitúdovou moduláciou (PAM) s rozdielnymi konštelačnými hodnotami.

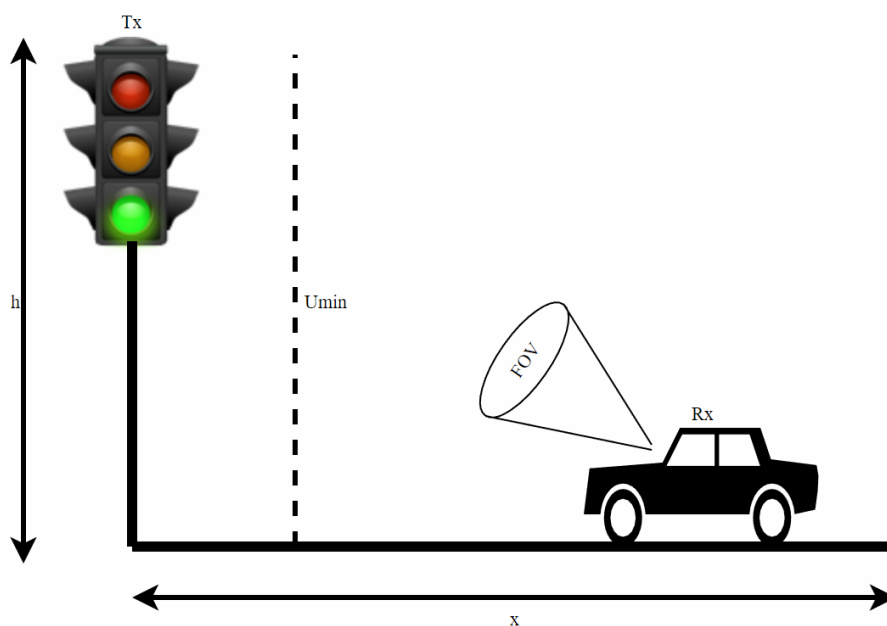
Tabuľka 1.5: *Výsledky simulácie*

Modulácia	Maximálna vzdialenosť (m)			
	Jasno	Dážď	Hmla (V=50 m)	Hmla (V=10 m)
2-PAM	72,21	69,13	52,85	26,93
4-PAM	61,49	58,88	45,12	23,01
8-PAM	53,23	50,98	39,17	19,98
16-PAM	45,81	43,88	33,81	17,25
32-PAM	38,73	37,11	28,71	14,66

Tabuľka popisuje maximálne možné vzdialenosti za rôznych podmienok kde BER nie je vyššia ako 10^{-6} .

3.2 Vplyv piesočnej búrky

Vplyv piesočnej burky na VLC ako jediný testoval K. J. Ebrahim z univerzity v Bahraine čo je na sever od Saudskej Arábie, viz [43]. Štúdia zaoberajúca sa vplyvom piesočnej búrky si zobrala svoj scenár pre model VLC od profesora Kumar et al. [29], ktorý je zobrazený na obrázku 18.



Obrázok 18 - Schéma profesora Kumar

Semafor predstavuje vysielateľ a prijímačom je auto, ktoré prijíma signál cez PD. Fixnými parametrami je výška semaforu 3 m a minimálna vzdialenosť vozidla od semaforu 2,05m kvôli vyžarovaciemu uhlu vysielateľa. Auto je testovanie na vzdialenosť až 500m. Pre

cestu signálu od vysielača k prijímaču sú pripravené rôzne typy piesočnej búrky. Tento experiment sa opiera o teoretické výpočty a na základe technických parametrov celej trasy je vytvorený matematický sled výpočtov pre toto spojenie. K tomu poslužil program Matlab R2013a.

3.2.1 Typy piesočnej búrky

Piesočná a prachová burka sú poveternostné úkazy spôsobené silným vetrom v suchých a piesočnatých podmienkach. Kedy vietor vynesie do atmosféry malé častice prachu a piesku. Takáto búrka zníži viditeľnosť na menej ako 1 km. Informácie o búrke podala meteorologická inštitúcia v Bharaine kde najhorším rokom bolo 2008 kedy efekt piesočnej burky postihol mesto. Vtedy bolo znížená viditeľnosť až 18 dní z roku. Meteorologická inštitúcia uvádza tri typy takejto búrky :

Minerálny prach : menej než 2 μm

Kalné častice : 2-74 μm

Piesočné a štrkové častice: väčšie ako 74 μm

Každý typ búrky je potom definovaný atmosférickým tlakom, indexom lomu a časticovým rádiusom. Existuje vzťah pre veľkosť častíc a vlnovou dĺžkou svetla.

3.2.2 Parametre

Do simulácie sú započítané 3 typy absorpcie vo voľnom prostredí. Prvým typom je molekulárny rozptyl (Rayleigho rozptyl). Ten vzniká keď sú častice menšie ako vlnová dĺžka vyžiareného svetla. Aerosól absorpcia zahŕňa zase interakciu vyžiareného svetla s atmosférickými časticami vo veľkosti 10-2 do 100 μm , čo odpovedá zhľuku niekoľkých molekúl. Ďalším je rozptyl na aerosóloch (Mie rozptyl), ktorý vzniká na týchto časticiach, ktoré sú vo veľkosti vlnovej dĺžky.

Simulácia predstavuje matematické súvislosti medzi technickými parametrami. K výpočtom bol použitý program Matlab, ktorý tiež vyhodnocuje výsledky. Vstupne technické parametre je možné vidieť v tabuľke 1.6.

Tabulka 1.6: *Technické parametre experimentu*

Výkon LED	30 mW
Počet LED	620
Rozloha prijímaču	9e-5 m ²
Vzdialenosť Tx a Rx	2,05 m
Zorný uhol	60°
Citlivosť fotodetektora	0.43 A/W
Zisk na optickom filtre	1
Index lomu otike fotodiody	1.5
Bolzmannová konštanta	1.3806488x10 ⁻²³ K/J
Stredný index lomu (vzduch)	1.003+0i
Elektrický náboj	1.602176487e-19 C
Šum	0.009444 w
Pásmo	20 Mhz
Vlnová dĺžka LED	640 nm
Viditeľnosť	0.1 – 10 km
Atmosférický tlak	Podľa typu burky
Teplota atmosféry	32°C
Index lomu častíc	Podľa typu burky
Časticový rádius	Podľa typu burky

3.2.3 Výsledky

Ab-Rahman a kol. [25] uvádzajú, že minimálna akceptovateľná SNR je 15dB. To odpovedá približne -60,084 dBm prijímanej energii. Výsledky pre čisté počasie sú uvedené v tabuľke 1.7.

Tabulka 1.7: *Prijímaná výkonová uroveň za jasného počasia*

	Jasné počasie	
	Min(500 m)	Max(2,864 m)
Prijímaná energia	-51,955 dBm	-10,221 dBm
SNR	30,113 dB	100,820 dB
BER	4,2 x 10 ⁻¹⁵	4,6x 10 ⁻⁴⁶

Takisto bola prevedená simulácia na 4 typy búrok pod rôznou hustotou častíc. Výsledky sú zobrazené v tabuľke 1.8

Tabulka 1.8: *Prijímaná výkonová úroveň za rôznych podmienok*

Typ burky	Slaba hustota		Stredna hustota		Vysoka hustota	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Ilovitá búrka	25,693 dB	100,807 dB	8,0124 dB	100,754 dB	0 dB	100,151 dB
Prachová búrka	27,031 dB	100,811 dB	14,704 dB	100,774 dB	0 dB	100,354 dB
Piesočná búrka	27,071 dB	100,811 dB	14,923 dB	100,774 dB	0 dB	100,361 dB
Štrková búrka	27,006 dB	100,811 dB	14,882 dB	100,774 dB	0 dB	100,359 dB

Pri hustej ílovitej búrke dochádza k najväčšiemu útlmu trasy. Maximálna vzdialenosť pri ktorej je možné komunikovať bolo 90 m. Zatiaľ čo ostatné husté burky dosahovali 120 – 140 metrov vzdialenosť.

3.3 Test hmly pri reálnych podmienkach

Scenár tejto štúdie zobrazuje dve auta idúce za sebou na dvojprúdovej ceste. Auta sú umiestnené v oboch pruhoch. Najhorší možný scenár je v prípade, ak auta idú po kraji vozovky kvôli zornému pólu. Preto si treba určiť základné parametre experimentu. Šírka vozidla je 1,7 m a šírka pruhu je 3,5m. Autá by sa mali držať bezpečnú vzdialenosť od seba. Z toho vzišiel maximálny uhol pre pozíciu vysielača a prijímača pri rýchlosti 80 km/h, viz [44].

3.3.1 Experiment

Obe platí, že útlm svetla prostredím je spojený vlnovou dĺžkou LED diódy, ktorá je použitá na komunikáciu. Výpočet útlmu [26,27] pre danú dĺžku je daný:

$$A(\lambda) \cong \frac{17,35}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\beta} \quad (3.3)$$

Kde $A(\lambda)$ je koeficient útlmu na kilometer. V je viditeľnosť na ceste, v tom prípade vzdialenosť atmosférickej dráhy pre prenos 2% výkonu. Vlnová dĺžka vysielača je λ . Parameter V je daný atmosférickým prostredím čo špecifikuje prostredie [18,20].

Tabulka 1.9: *Pomocné koeficienty pre experiment*

β	Viditeľnosť
1,6	$V > 50$ km
1,3	$6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$
$0,16V+034$	$1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$
$V-0,5$	$0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}$
0	$V < 0.5 \text{ km}$

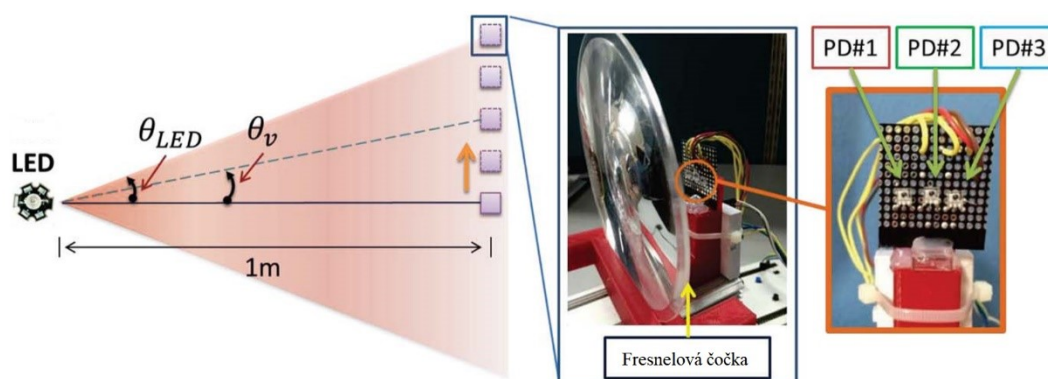
V experimente boli otestované 3 najviac používané LED. Červené (630 nm), zelená (535 nm) a modrá (475 nm), kde sa zistilo že červená vykazuje najnižší koeficient útlmu.

Červená LED bude podrobená ďalšiemu skúmaniu, ktorá je tiež štandardom zadných svetiel v automotive. Koeficienty útlmu pre dané počasie sú vyobrazené v tabulke 1.10.

Tabulka 1.10: Útlmové koeficienty pre rôzne poveternostné podmienky

Počasié	Viditeľnosť (km)	Útlm (dB/km)
Jasno	20	0,73
Ľahká hmla	1	15,15
Hustá hmla	0,5	30,29

Ako zdroj bola teda použitá 1-W LED dióda červenej farby so šošovkou, ktorá reprezentuje zadné svetlo. Ako prijímač boli použité 3 fotodiódy stojace blízko u seba. Pred týmito fotodiodami sa nachádza Fresnelova čočka kvôli fokusácii svetla.

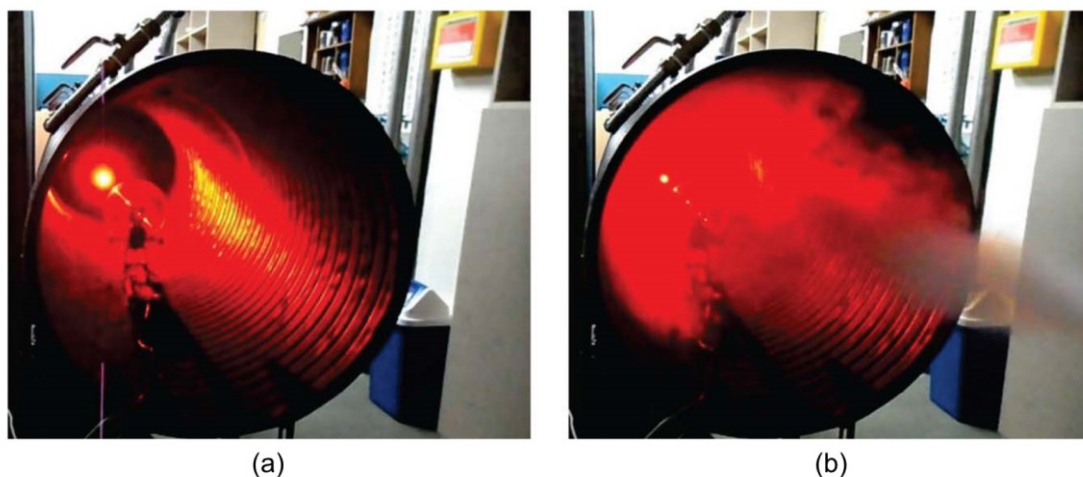


Obrázok 19 - Nastavenie pre experiment s Fresnelovu čočkou

Zdroj signálu je fixne na jednom bode. Prijímač je vzdialený 1 m. S ním sa teraz bude posúvať tak, aby nepresiahla $22,5^\circ$ uhol, ktorý spolu zvierajú zdroj a detektor. Výsledkom experimentu je, že pomocou Fresnelovej čočky má väčšie $SNR = 25$ dB ako experiment bez nej a teda väčší odstup signálu od šumu.

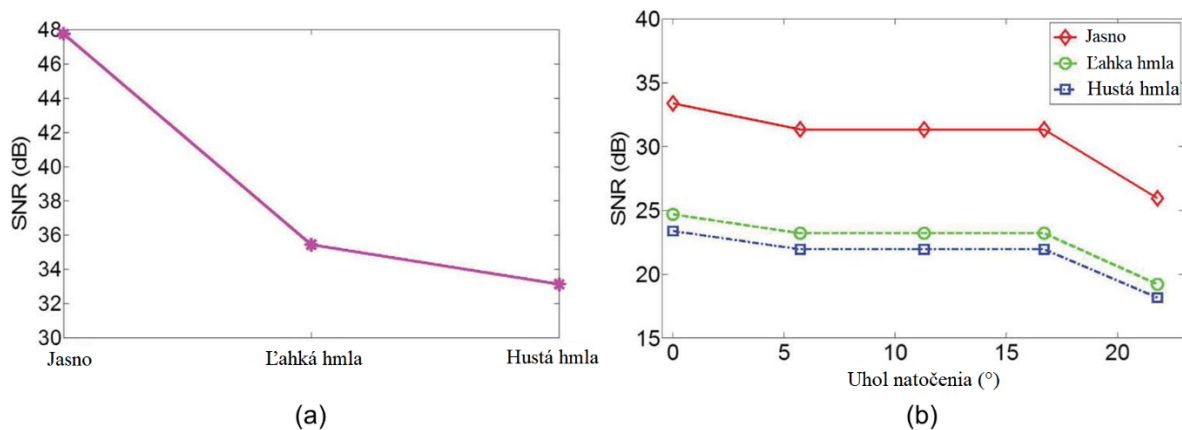
3.3.2 Simulácia

Cieľom simulácie je však odsimulovať hmlu na toto experimentálne meranie. Vedúci simulácie Y. H. Kim a jeho tím skonštruovali tmavú oválnu komoru. Ta slúžila na udržanie hmly ktorá do nej bola napustená cez generátor hmly. Na obrázku 20 je možné vidieť toto nastavenie.



Obrázok 20 - Tmavá komora pre experiment

Prenosová rýchlosť bola 1 kbit/s na vzdialenosť 1 m zdroju od detektora. V simulácii je použitá jednoduchá OOK modulácia ktorá bola aplikovaná na 1 wattovú červenú diódu. Vyžarovací uhol tejto diódy s čočkou je 45° . Aktívna plocha fotodetektora bola o rozlohe 0,26 mm². Pri meraniach sa ako výpovedná hodnota brala PD, ktorá dosahovala najvyššiu amplitúdu.



Obrázok 21 - Dosiahnuté výsledky

Výsledkom je, že aj pri väčšom uhle je možné za pomoci pomocnej optiky prenášať signál. Ten však bude obmedzený na krátku vzdialenosť a to obzvlášť pri hmle.

4 Experimentálna časť časť

Moju prácu by som rozdelil na dve hlavné etapy. Prvá z nich je testovanie VLC komunikácie v laboratórnych podmienkach za pomoci techniky OFDM. Tu som zisťoval hranice pre parametre komunikácie ako čo najspoľahlivejšie prenášať informáciu. Hlavným ukazateľom bola chybovosť BER spolu s preneseným spektrom. Chybovosť som meral s presnosťou $10e-6$ a hodnoty som zaznamenával do chybovosti $10e-3$. Vyššia chybovosť je pre komunikáciu nepoužiteľná ani pri použití rôznych samoopravných kódov. To však nebolo predmetom výskumu. Chybovosť bola ovplyvňovaná rastúcou vzdialenosťou a horizontálnym posunom zdroju a detektoru. Taktiež aj technickými parametrami kanálu. Tieto parametre kanálu ako je nosný kmitočet, šírka pásma, modulácia som menil za pomoci obslužnej aplikácie NXG 3.0 LabView ktorá riadi softwarovo definovaného rádia (NI USRP). Výsledky experimentu sú v kapitole 5. 6. 7. 8.

Výsledky dosiahnuté v prvej kapitole mi povedali aké sú hranice pre jednotlivé parametre a ako sa svetlo celkovo správa pri rôzdielných parametroch. Ďalej som sa v druhej etape venoval vplyvu atmosférických javov ktoré som sa snažil vhodne simulovať v laboratórnych podmienkach. Atmosférické javy ako je dážď a hmla nepriaznivo vplývajú na komunikáciu vo viditeľnom svetle. Viac v kapitole 3.3. Ďalším aspektom pre V2V komunikáciu je vplyv vibrácií ktoré môžu vzniknúť na našich cestách. Vibrácie sú tak isto predmetom skúmania. V poslednom rade som sa venoval porovnaniu vonkajšieho merania s laboratórnymi podmienkami.

Ako už bolo spomenuté v kapitole 2. OFDM obsahuje rôzne typy ochrany voči intervenciám a to za cenu prenosovej rýchlosti. Tabuľku prenosových rýchlostí môžete vidieť v tabuľke 1.11. Ide o teoretickú prenosovú rýchlosť ktorá bola počítaná zo vstupných parametrov kanálu. Do jednej periódy užitočného signálu som vkladal 100 000 bitov, ktorá po prechode algoritmu OFDM nadobudla veľkosť v sámploch. Tuto užitočnú veľkosť v sámploch som podelil celkovou šírkou kanálu ktorá udávala počet sámplov za jednu sekundu. Tým som dosiahol čas trvania jednej periódy. Potom už bolo zjrejmé za aký čas som schopný preniesť 100 000 bitov. Tuto veľkosť som už len podelil časom aby som zistil koľko periód sa danou veľkosťou v bitoch zmestí do jednej sekundy.

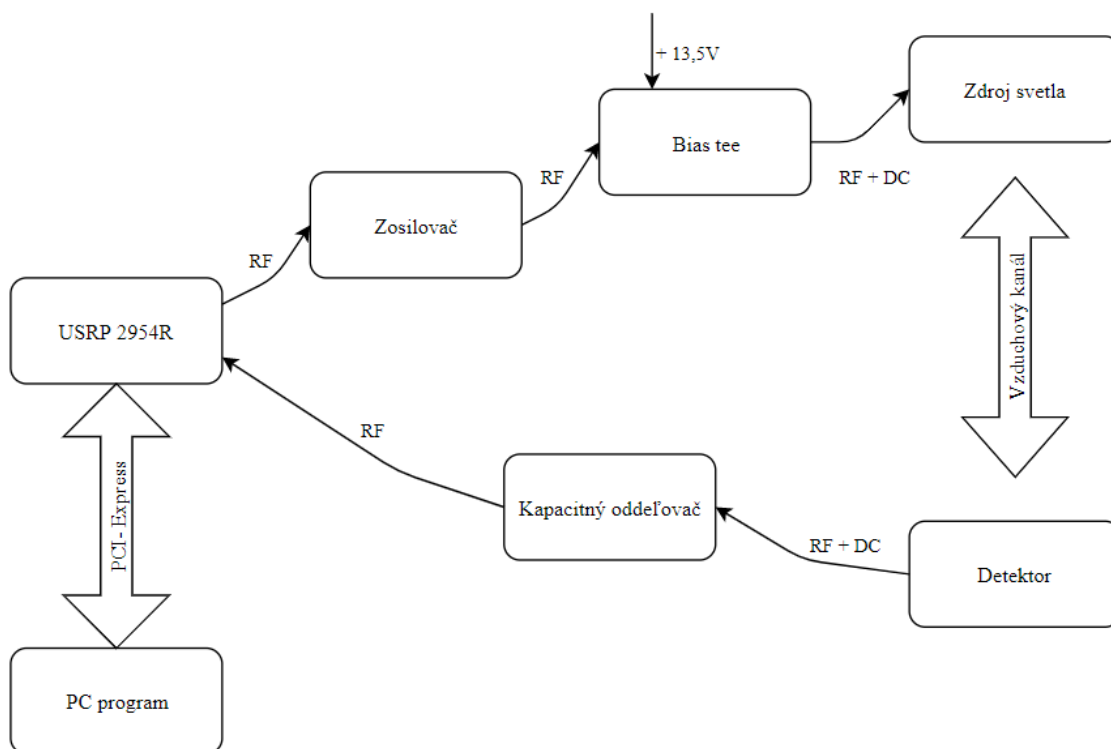
Tabulka 1.11: *Prenosová rýchlosť*

IQ rate [kHz]	QAM 4 [Mbit/s]	QAM 8 [Mbit/s]	QAM 16 [Mbit/s]	QAM 32 [Mbit/s]	QAM 64 [Mbit/s]
400	0,312671	0,468549	0,625684	0,78232	0,941398
600	0,469006	0,702823	0,938527	1,17348	1,4121
800	0,625342	0,937097	1,25137	1,56464	1,8828
1000	0,781677	1,17137	1,56421	1,9558	2,35349
1200	0,938013	1,40565	1,87705	2,34696	2,82419
1400	1,09435	1,63992	2,1899	2,73812	3,29489
1600	1,25068	1,87419	2,50274	3,12928	3,76559
1800	1,40702	2,10847	2,81558	3,52044	4,23629
2000	1,56335	2,34274	3,12842	3,9116	4,70699
2200	1,71969	2,57702	3,44126	4,30276	5,17769
2400	1,87603	2,81129	3,75411	4,69392	5,64839
2600	2,03236	3,04557	4,06695	5,08508	6,11909
2800	2,1887	3,27984	4,37979	5,47624	6,58979
3000	2,34503	3,51412	4,69263	5,8674	7,06048
3200	2,50137	3,74839	5,00547	6,25856	7,53118
3400	2,6577	3,98266	5,31832	6,64972	8,00188
3600	2,81404	4,21694	5,63116	7,04088	8,47258
3800	2,97037	4,45121	5,944	7,43204	8,94328
4000	3,12671	4,68549	6,25684	7,8232	9,41398

Hodnota prenosovej rýchlosti je udávaná v Mbit/s. National instruments po novom začali používať pojem IQ rate. Inak povedane ide o vzorkovaciu frekvenciu s tým rozdielom že chráni šírku pásma aby neprekročila hranice skreslenia spektra. Väčší počet vzorkov za sekundu ma za následok väčší počet OFDM obálok za sekundu tým je možné dosiahnuť vyššiu prenosovú rýchlosť. S rastúcim IQ rate pomáha zvýšiť prenosovú rýchlosť aj modulácia. V mojej práci používam X-QAM moduláciu ktorá vyjadruje hodnotu za pomoci amplitudy a fázy. Čím vyšší rád modulácie tým daný stav reprezentuje viac bitov.

4.1 Zoznam prístrojov

V úvode praktickej časti by som chcel bližšie priblížiť schému zapojenia. Tu vidieť na obrázku 22.



Obrázok 22 - Schéma zapojenia

Všetko to začína u vývojového prostredia LabVIEW NXG – National instruments, ktorý je nainštalovaný na počítači. Ten je spojený pomocou PCI – Express zbernicou s USRP 2954R kvôli rýchlosti pretože všetky výpočty prebiehajú na počítači. Toto USRP slúži ako generator modulovaného RF signálu. Výstup vysielateľa USRP je privedený na zosilovač, ktorý zosilní RF signál, teda zvýši hĺbku modulácie. K samotnému rozsvieteniu zdroja svetla je zapotreby jednosmerná zložka ktorá sa spojí s RF signálom v pasívnom prvku Bias tee. Jednosmerná zložka s RF signálom je spoločne privedená na zdroj svetla a môže sa začať vysielanie. Detektor za pomoci pomocnej optiky zachytáva žiarenie a premienajú na elektrický napätie. Kapacitný oddeľovač má za úlohu oddeliť jednosmernú zložku a poslať na prijímací kanál USRP iba RF zložku. Data sú z USRP cez zbernicu poslané do počítača a vyhodnocované. Podrobnejšie parametre jednotlivých častí popíšem v kapitole 3.1.

Fotografiu z merania na chodbe vidieť na obrázku 23.



Obrázok 23 - Fotografia merania na chodbe

Na kvalitu signálu, či už na vysielacej alebo prijímacej strane, ma vplyv aj celkove prepojenie jednotlivých blokov. Myslím tým kvalitu káblov, dĺžku, typy konektorov, redukcií a podobne. Asi najväčší problém vidím v detektore ktorý bolo možné pripojiť jedine BNC káblom na ktorý bola napojená redukcia na SMA.

4.1.1 USRP 2954R

Je to rekonfigurovateľne zariadenie ktoré je postavené na architektúre I/O(RIO) a univerzálnych softwarových perifériách. Obsahuje výkonný FPGA pre pokročilé DSP ktoré sa programujú pomocou modulu LabView FPGA. Zariadenie obsahuje 2x2 MIMO teda dva kanále. Každý kanál ma svoj výstup Tx a výstup Rx. Na obrázku 24 môžete toto zariadenie vidieť.

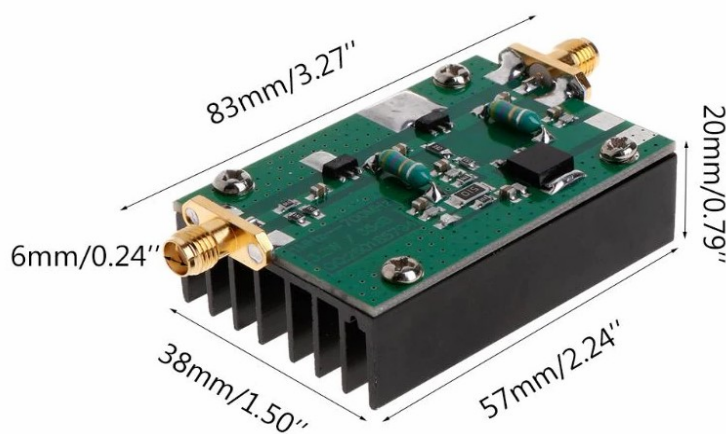


Obrázok 24 - USRP 2954R (SDR)

Štandardne toto zariadenie používa meracie karty ktoré pracujú v oblasti 10 MHz až 6 GHz. Tieto sú umiestnené na základnej doske zariadenia. Toto frekvenčné pásmo pre používanie VLC nie je ideálne vzhľadom na odozvu LED. Preto bolo za potreby výmena týchto kariet za nízko frekvenčné. Dcérska karta LFTX bola umiestnená na RF 0 kanál a dokáže pracovať v pásme 0-30 MHz. Druhá dcérska karta LFRX pracuje v oblasti 0-50 MHz a bola umiestnená na USRP kanál RF 1. Samozrejme hranice pásma ktoré ponúkajú nemusia byť lineárne. Tieto nízko frekvenčné karty oproti štandardným nepodporujú zisk.

4.1.2 Zosilňovač

Na zosilnenie RF signálu z USRP som použil zosilňovač, ktorý zosilňuje signál o 35 dB. Je Externe napájaný 12 V zo zdroja a jeho frekvenčné pásmo je od 1 MHz – 700 MHz. Na obrázku 25 môžete vidieť toto zariadenie.



Obrázok 25 – Zosilňovač

4.1.3 Bias tee

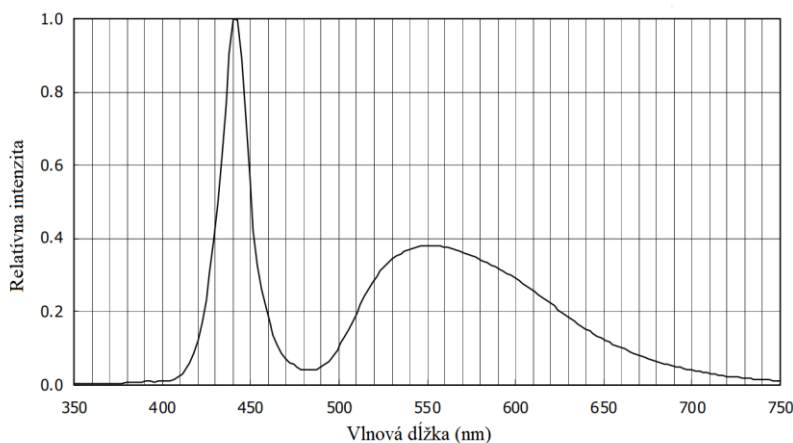
Bias tee je pasívny prvok ktorého úloha je spájať jednosmernú zložku (DC) a rádiový signál (RF) ktorý prichádza z USRP. Výstup z Bias Tee je priamo privedený na svetlo použité ku komunikácii. Toto zariadenie nám umožňuje modulovať časť optického výkonu a zabrániť tak poklesu intenzity svetla.

4.1.4 Zdroj svetla

Ako zdroj svetla boli použité dva svetlomety ktoré mi zapožičala firma Varroc Lighting. Obe z nich pochádzajú z auta Škoda Karoq. Vzhľadom na to že denne svietenie je povinné bolo predný svetlomet podrobený experimentu. U zadnej lampy sa z hľadiska bezpečnosti ďalej testuje brzdomá funkcia.

4.1.4.1 *Headlamp DRL Škoda Karoq*

Ako som už spomenul ide o denne svietenie predného svetlometu. Táto funkcia je tvorená indirektnými parabolami, totiž LED svietia smerom k zemi a za pomoci geometrických reflektorov je svetlo odrážané na potrebný smer. Tieto paraboly sú vyrobené z tepelne odolného plastu, na ktorom je nanosená leštená vrstva hliníku ktorá má 80 % odrazivosť. Celkový počet parabol je 4 pre každú LED zvlášť. Ako zdroj je použitá LED 4xNICHIA NJSW172A (80 lm) ktorá vyžaruje biele svetlo. Spektrum je možné vidieť na obrázku 26.



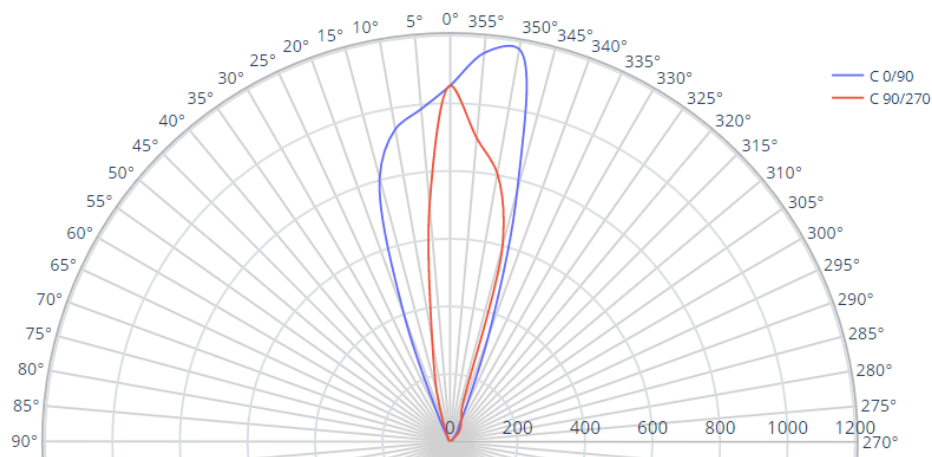
Obrázok 26 - Spektrum NICHIA NJSW172A

Biele svetlo nemá svoju vlastnú vlnovú dĺžku, vzniká teda spojením viacerých farieb ako zobrazuje. Na obrázku 27 je možné vidieť predný svetlomet.



Obrázok 27 - Predný svetlomet

Cely svetlomet ako je na fotografii nebolo možné umiestniť na školský goniofotometer kvôli rozmerom. Preto bolo z neho odstránene vonkajšie sklo. DRL je realizované ako vymeniteľný modul ktorý bol vybratý a umiestnený na prístroj za účelom merania smerovej charakteristiky. Smerová charakteristika je vykreslená pomocou polárnych súradníc.



Obrázok 28 - Smerová charakteristika DRL modulu

Rovina C 0/90 predstavuje horizontálnu rovinu a C 90/270 zase vertikálnu.

4.1.4.2 Brzdové svetlo Škoda Karoq

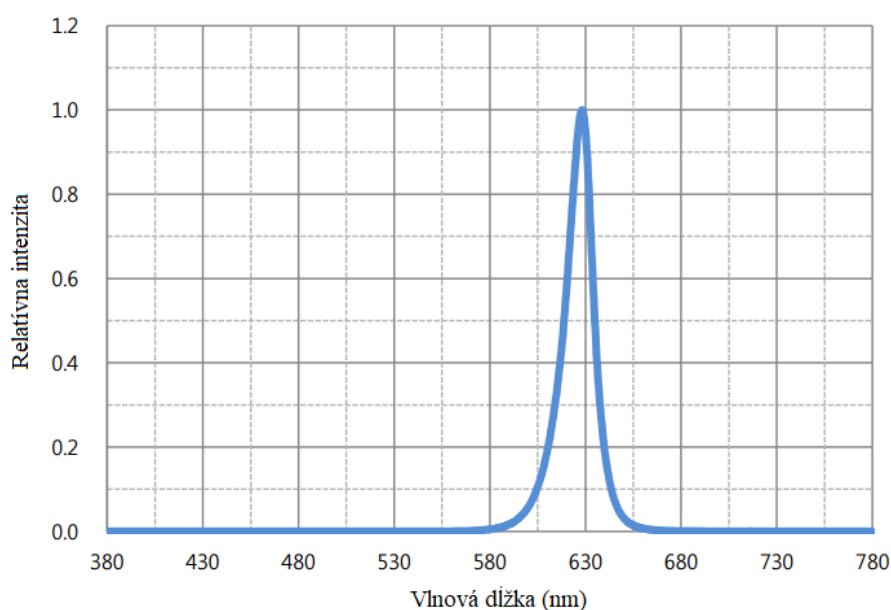
Brzdová funkcia zadného svetlometu je obdobne riešená ako DRL predného svetla. Tiež ide o indirektné reflektory s leštenou vrstvou hliníku ktorá ma 80% odrazivosť. V tomto prípade ide však o systém 6xLED SPMRD1346EA0 z ktorých každá ponúka 16 lm. Svetlo je možné vidieť na obrázku 29.



Obrázok 29 - Zadný svetlomet

Zadný svetlomet oproti prednému obsahuje filter. Tento filter vyrobený z čistého polycarbonátu obsahuje optiku na lámanie svetla. Ako materiál na výrobu vonkajšieho skla bolo červené PMMA.

Vyžarované spektrum vlnových dĺžok je možné vidieť na obrázku 30.



Obrázok 30 - Spektrum SPMRD1346EA0

Červená farba svetla naberá maximálnu intenzitu približne v 630 nm. Oproti prednému je tato spektrálna čiara podstatne užšia čo bude mať veľký vplyv na dosiahnuteľnú vzdialenosť.

4.1.5 Fotodetektor

Ako detektor svetla bol použitý fotodetektor PDA36A – EC s nastaviteľným ziskom od firmy Thorlabs. Ide o Si PIN fotodetektor ktorý umožňuje reguláciu zisk do 70 dB. Fotodetektor je na obrázku 31.



Obrázok 31 - Fotodetektor PDA36A-EC

Technické parametre PDA sú vyobrazené v tabuľke 1.12.

Tabuľka 1.12: *Parametre fotodetektoru*

Typ detektora	Si PIN
Aktívna časť	3,6x3,6 mm (13 mm ²)
Rozsah vlnových dĺžok	350 – 1100 nm
Maximálny zisk	70 dB
Maximálna šírka pásma	10 MHz

Zisk je pri tomto detektore má svoje výhody aj nevýhody. So zvyšujúcim sa ziskom rapídne klesá šírka pásma ktorú je schopný efektívne zosilňovať. Pri nastavení maximálne zisku 70 dB vie efektívne pracovať iba na 5 kHz šírke pásma. Zisk som počas meraní menil pretože pri krátkej vzdialenosti sa dostával do saturácie. Avšak vzhľadom na vzdialenosť mi výrazne pomohol. Prehľad šíriek pásma pri danom zisku je možné vidieť v tabuľke 1.13.

Tabuľka 1.13: *Zisk detektoru*

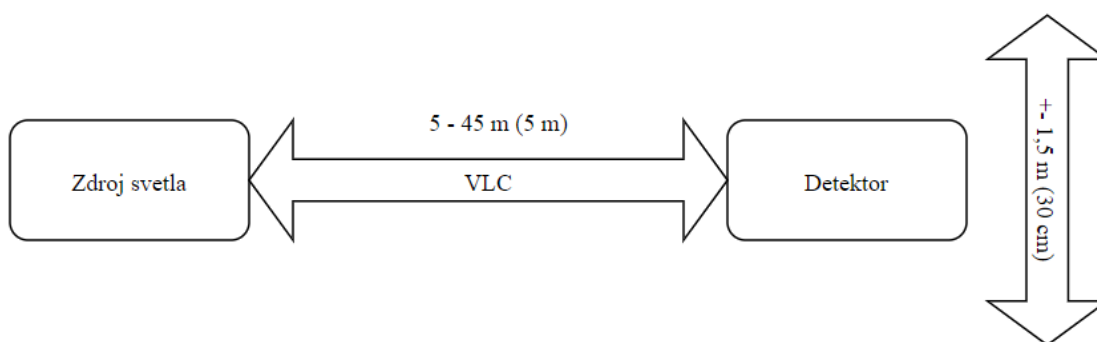
Zisk	Šírka pásma
0	10 MHz
10	5,5 MHz
20	1,0 MHz
30	260 kHz
40	150 kHz
50	45 kHz
60	11 kHz
70	5 kHz

Pri všetkých typoch a kombináciách bola použitá čočka spojitého charakteru ktorá bola umiestnená pred detektor. Jej funkcia spočívala v zaostrovaní komunikačného svetla na tzv. ohniskový bod ktorý bol v tom to prípade aktívna časť fotodetektoru.

5 Výsledky meraní

Hlavné merania prebiehalo na podzemnom podlaží novej budovy FEI ktorá ponúka dostatočnú dĺžku chodby. Ohnisko svetlometov a detektor boli umiestnené v strede chodby približne 1 meter vo výške. Dôležitým aspektom bolo samotne na pozicovanie svetlometov a detektoru. V prvom rade bolo za potreby aby som našiel ohniskovú vzdialenosť čočky od aktívnej plochy detektoru. Počas jednotlivých posunov čočky som sledoval priemernú amplitúdu užitočného signálu. Obdobným postupom som hľadal aj maximálnu intenzitu svetlometu samotným posunom a naklápaním svetla a detektoru kde hlavným ukazateľnom bola amplitúda užitočného signálu.

Schému krokov merania je vidieť na obrázku 32.



Obrázok 32 - Kroky merania

Zdroj svetla od detektoru bol prvotné nastavený na vzdialenosť 5 metrov. V grafickom prostredí LabView som nastavoval nosnú frekvenciu, šírku pásma a rad modulácie QAM kde som pri každej konfigurácii sledoval spektrum, konštelačný diagram a chybovosť BER. Nosná frekvencia začínala pri 1Mhz s postupným navyšovaním 0,5 MHz. Nízko frekvenčné karty umožňujú minimálnu šírku pásma 400 kHz pričom ich maximum bolo závisle na aktuálnej nosnej frekvencii. Postupným zvyšovaním šírky pásma, s krokom 200 kHz som zapisoval jednotlivé chybovosti a pri určitých hodnotách som ukladal aj spektra s konštelačnými diagramami. Všetky kombinácie boli taktiež realizovane pre 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM. Vyššie modulačné formáty nefungovali vzhľadom na OFDM navrhnuté v LabView.

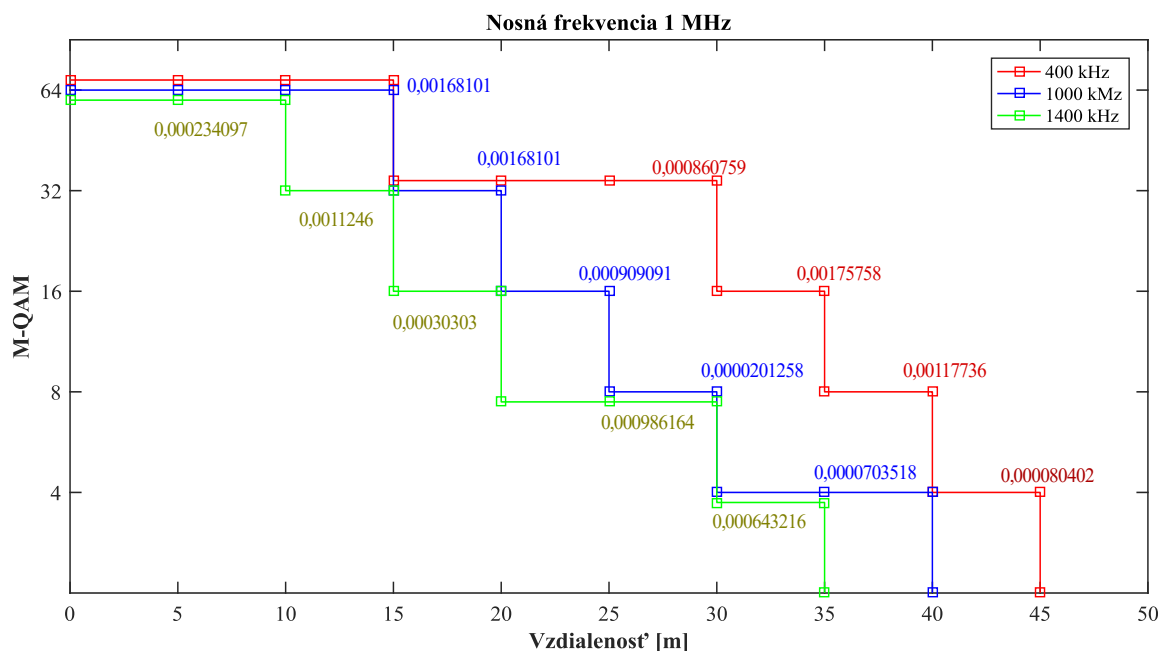
Zdroj svetla bol umiestnený staticky. Ďalšou fázou bola zmena umiestnenia detektora na chodbe. Po nameraní hodnôt napriamo som začal horizontálne posúvať detektor voči zdroju svetla. S 30 cm krok od oboch strán až na 1,5 metra. Následne bol detektor posúvaný napriamo po 5 m až kým som bol schopný detekovať prenášané informácie.

V práci uvádzam len výsledky meraní pre určité parametre kvôli veľkému počtu. Pre zistenie výsledkov iných konfigurácií je potrebné nahliadnuť do Prílohy I.

5.1 Predný svetlomet

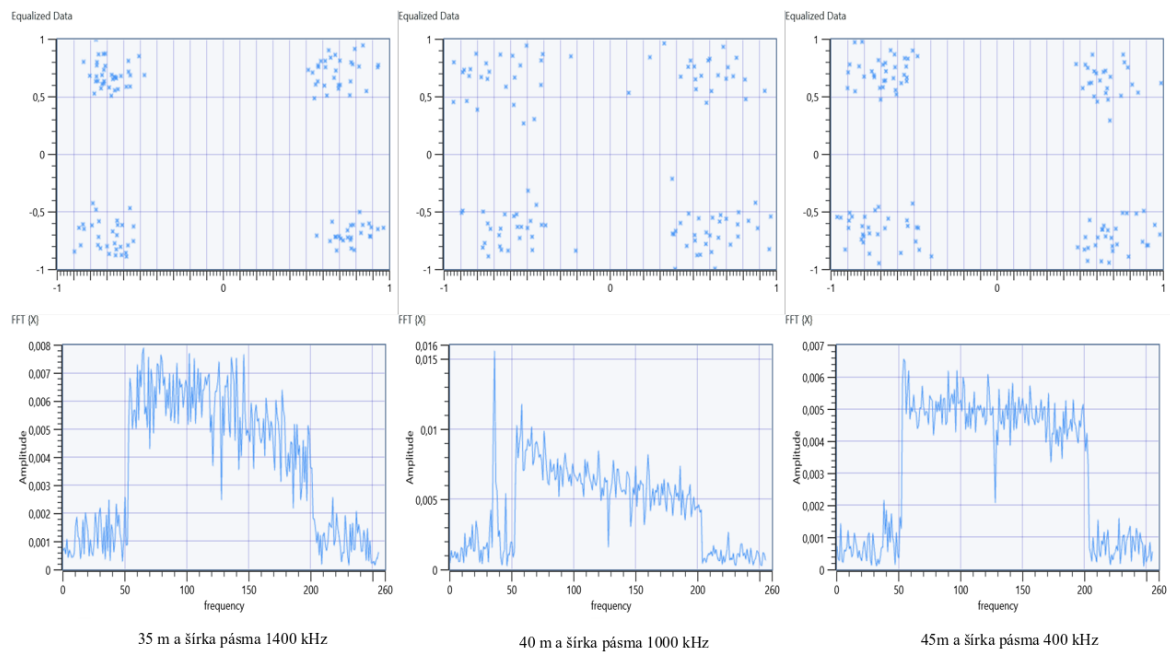
Pri meraní predného svetlometu na 5 m som musel zmeniť zosilnenie na detektore na 50 dB. Intenzita svetla bola natoľko vysoká že spôsobila saturáciu detektoru a nebolo možné získať užitočnú informáciu. Inak všetky ostatné merania prebiehali na 60 dB.

Výsledky poukazujú na to že zo zvyšujúcim sa radom QAM , šírkou pásma a nosnou frekvenciou klesá dosiahnuteľná vzdialenosť. Obrázok 33 opisuje limity nosnej frekvencie 1 MHz. Je možné vidieť ako zo zvyšujúcou šírkou pásma sa znižuje dosah. Okrem toho som u grafov vypisoval jednotlivé chybovosti ktoré boli dosiahnuté pri meraniach.



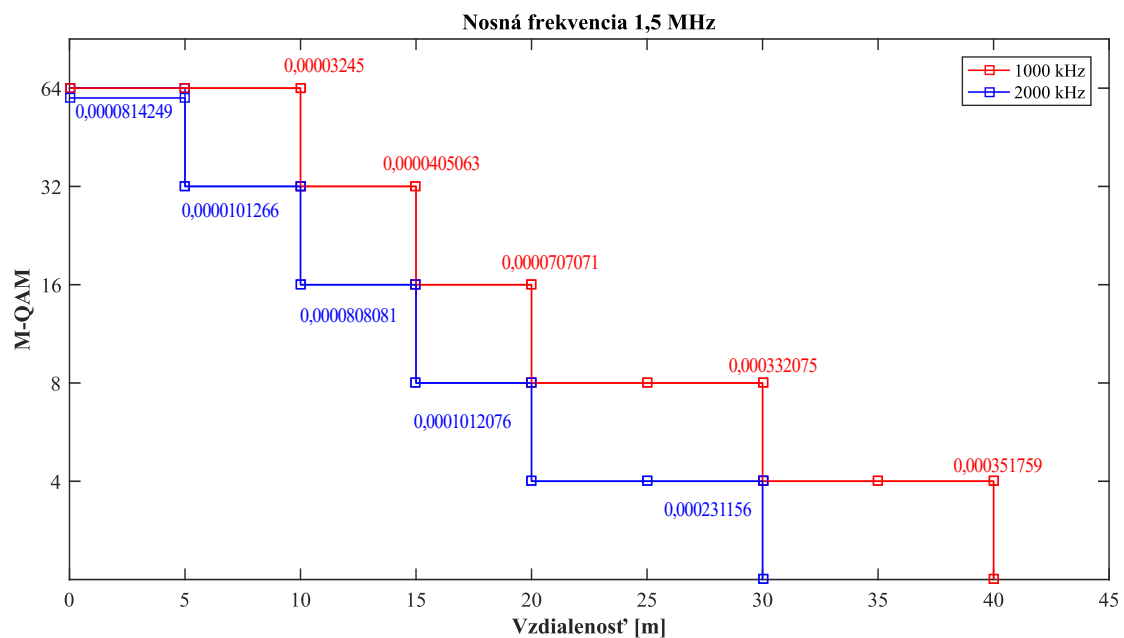
Obrázok 33 - Limity pre rôzne šírky pásma

Modulačný formát 4-QAM predstavuje najväčšiu istotu komunikácie avšak za cenu prenosovej rýchlosti.



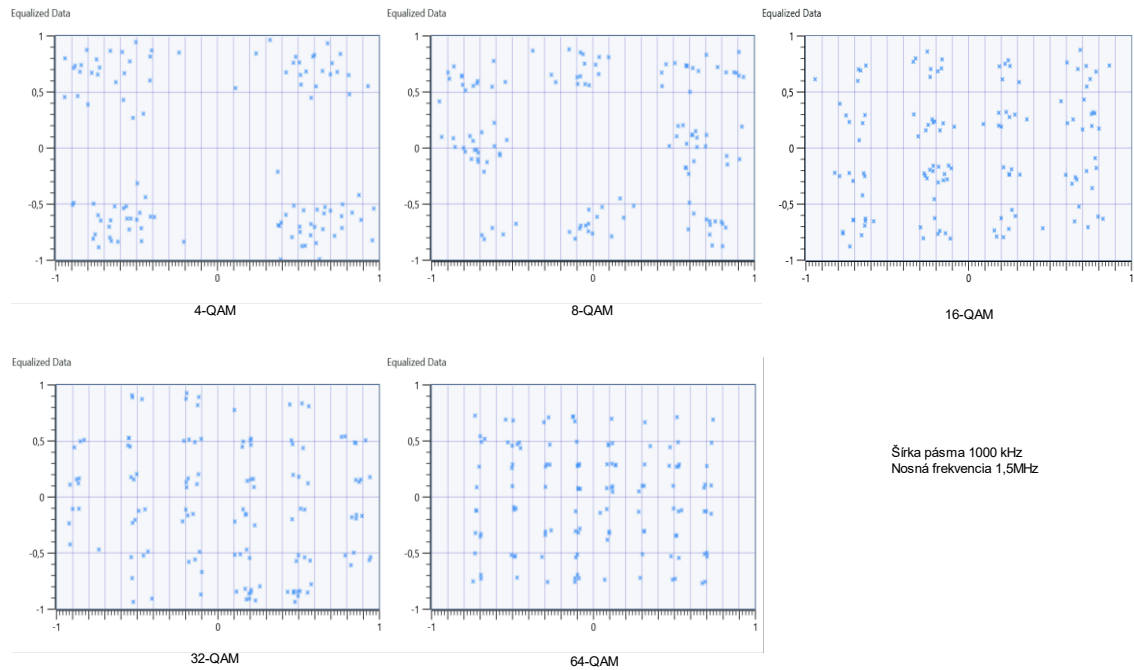
Obrázok 34 - Porovnanie prijímaného signálu

Ukážku spektier a konštelčných diagramoch pre 4-QAM je možné vidieť na obrázku 34. Spektra sú vyobrazené v nepreloženom pásme, takže osa x neodpovedá reálnym frekvenciám. Signál na prijímacej strane predstavoval komplexné čísla, z ktorých som odoberal imaginárnu časť a zaznamenával do grafu.



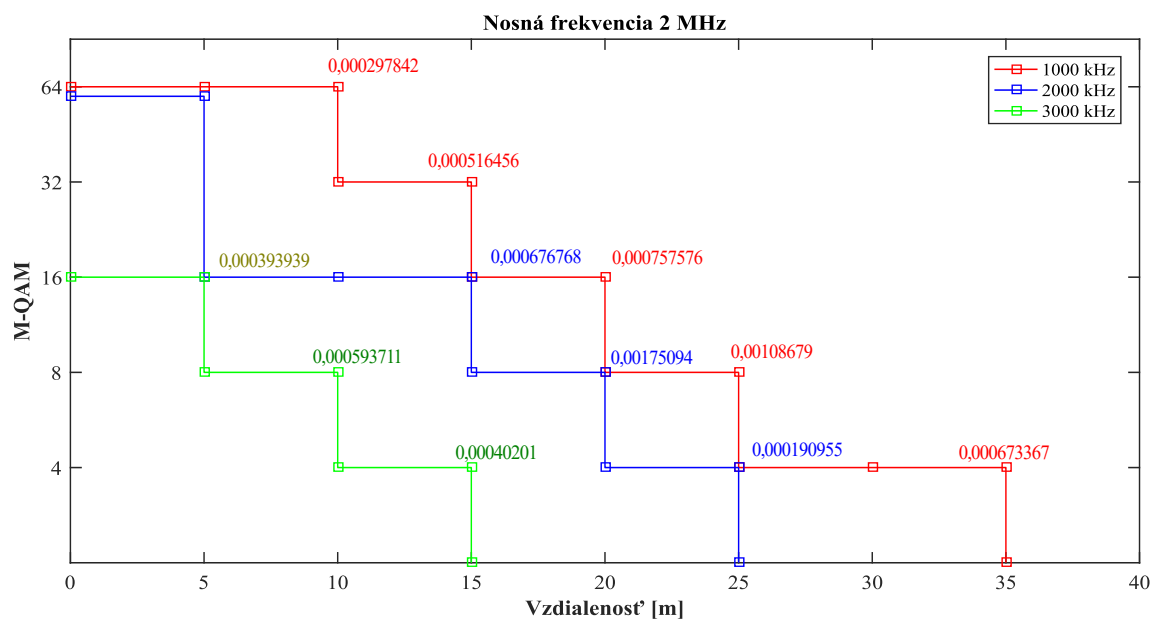
Obrázok 35 - Limity pre rôzne šírky pásma

Graf – obrázok 35 popisuje jednotlivé limity pre šírku pásma 1000 a 2000 kHz pre nosnú frekvenciu 1,5 MHz. Na obrázku 36 je zas možné vidieť konštelačné diagramy k jednotlivým BER v grafe pri šírke pásma 1000 kHz.



Obrázok 36 - Ukážka konštelačných diagramov

Obdobným spôsobom som vykreslil aj limity pre nosnú frekvenciu 2 MHz.

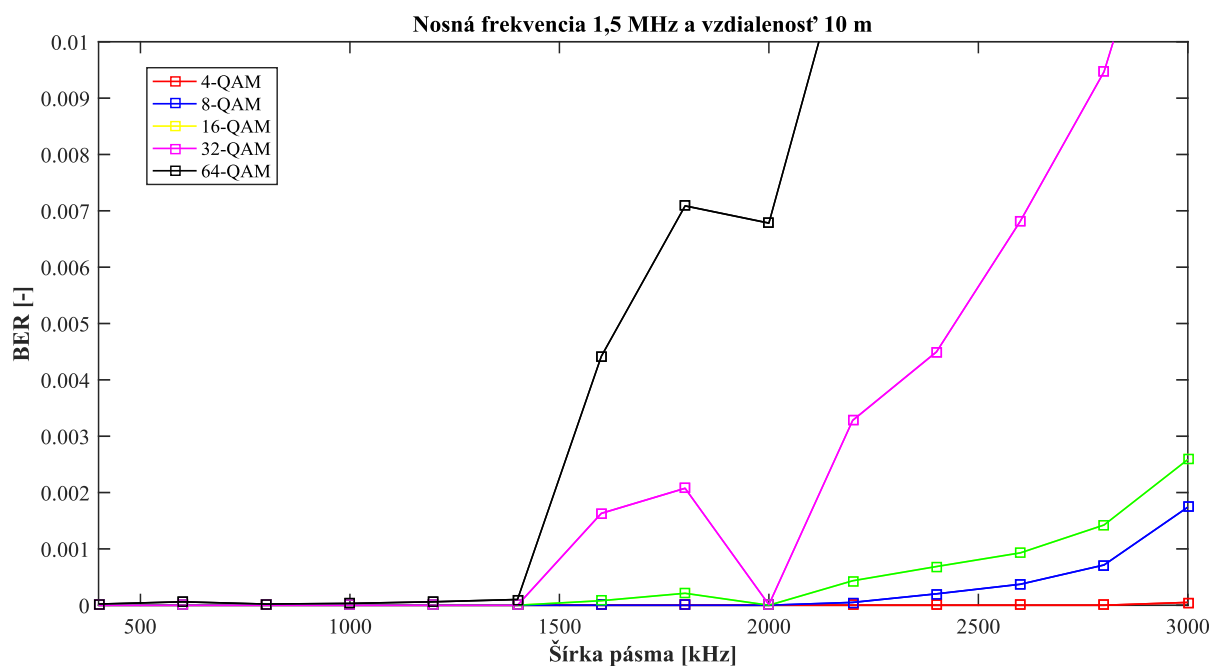


Obrázok 37 - Limity pre rôzne šírky pásma

Na grafe – obrázok 37 je už možné vidieť ako pri rozdielnych nosných frekvenciách klesá dosiahnuteľná vzdialenosť o 5 m pri šírke pásma 1000 a 2000 kHz. Zásadný rozdiel nastáva pri šírke pásma 3000 kHz kedy je možné vidieť podstatné zníženie dosahu komunikácie.

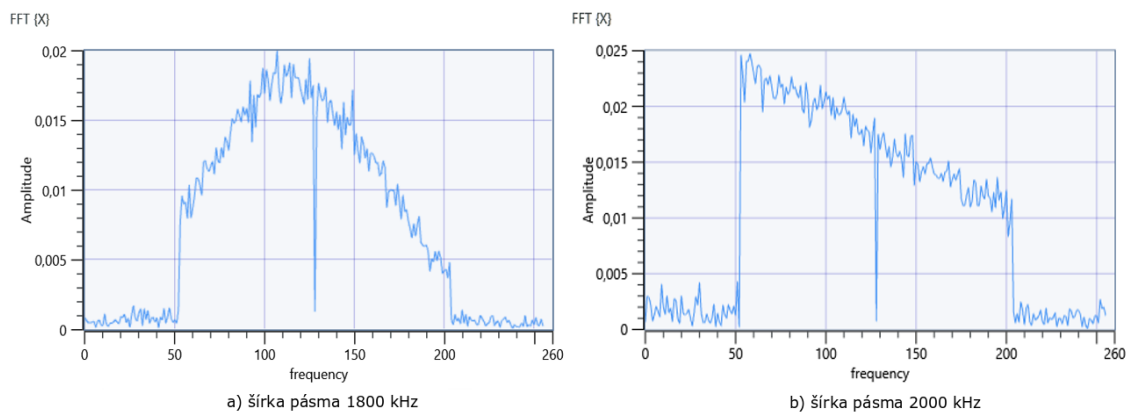
5.1.1 Šírka pásma

Pre dosiahnutie vyššej prenosovej rýchlosti je veľmi dôležitá šírka pásma na ktorej prebieha komunikácia. Tá nám umožňuje preniesť viac dát za jednotku času. Graf – obrázok 38 popisuje závislosť šírky pásma pri nosnej frekvencii 1,5 MHz. Dáta pochádzajú z merania napriamo pri 10 m.



Obrázok 38 - Závislosť šírky pásma

V oblasti 1600-1800 kHz šírky pásma je možné vidieť chybovosť ktorá je podstatne vyššia ako chybovosť na 2000 kHz. Šírku pásma definujem ako globálne nastavenie USRP na ktorom bude prebiehať komunikácia. Niektoré z nastavených pásiem nefungovali správne a nastávalo skreslenie spektra na ktorom som chcel komunikovať. Je to dané samotným hardvérovým návrhom daného USRP.

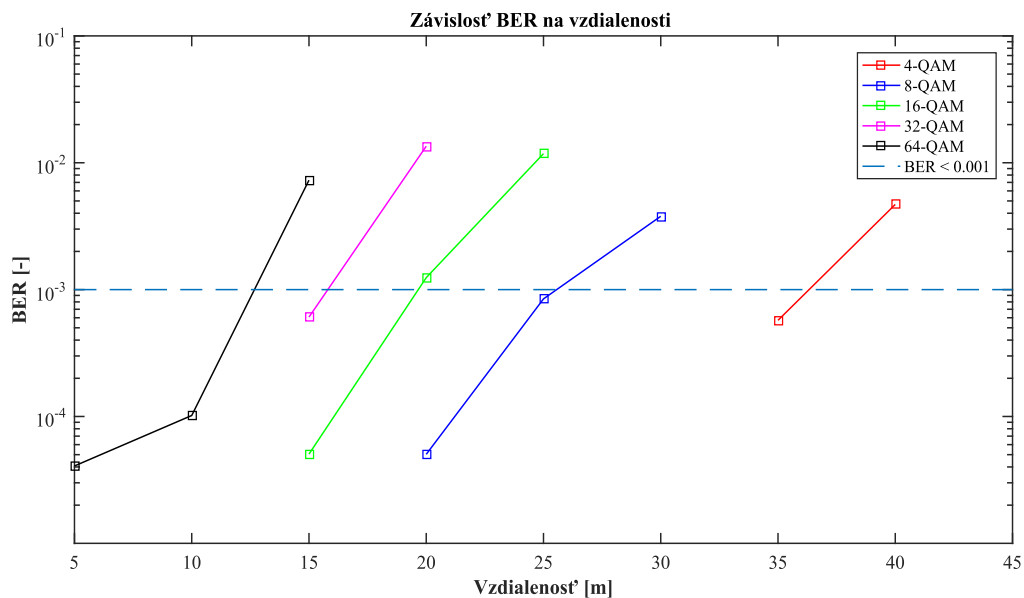


Obrázok 39 - Porovnanie spektier

Obrázok 39 porovnáva spektra na šírke pásma 1800 a 2000 kHz.

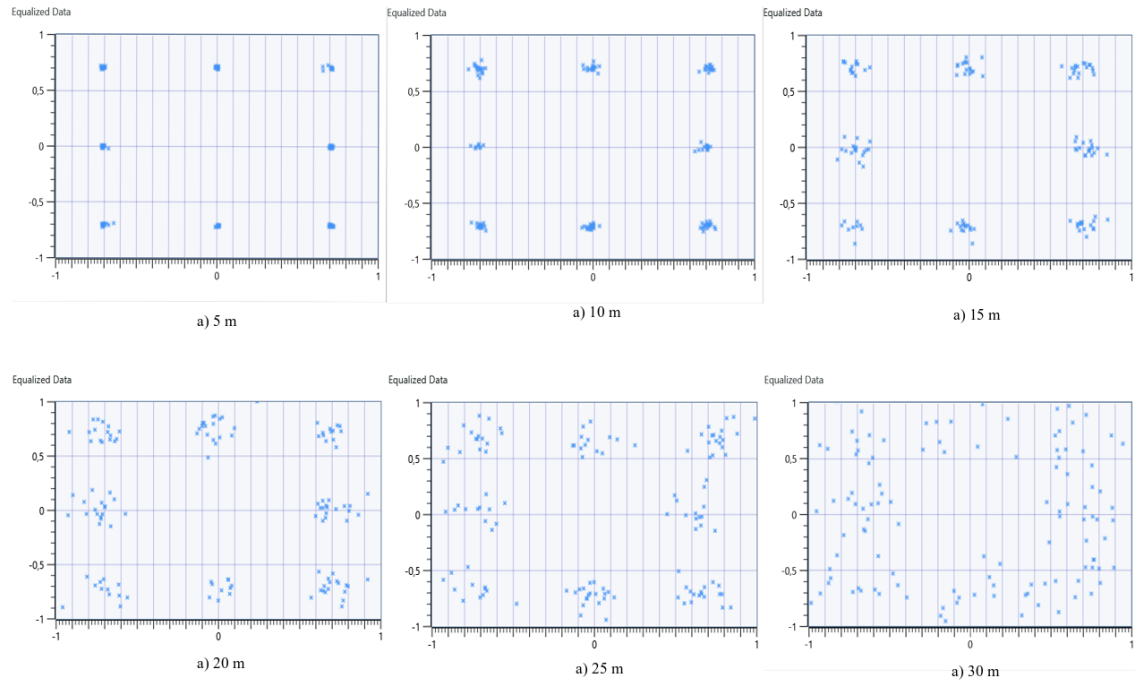
5.1.2 Závislosť BER na vzdialenosti

Ako bolo už v úvode povedané, prijateľnú chybovosť budem považovať za $BER < 0.001$. Graf – obrázok 40 popisuje závislosť chybovosti na vzdialenosti pri šírke pásma 1400 kHz na nosnej frekvencii 1,5 MHz. Do grafu som vykreslil iba nenulové hodnoty. Modulácia 4-QAM pri danej konfigurácii nadobudla merateľnú chybovosť až pri 35 metroch. Do tej doby bola chybovosť nulová.



Obrázok 40 - Závislosť BER na vzdialenosti

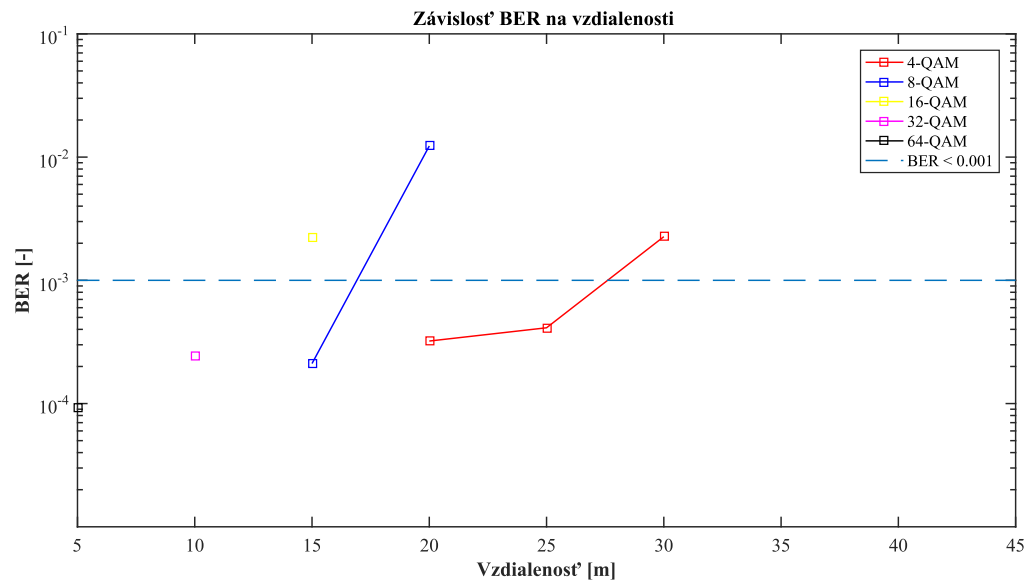
Jednotlivý priebeh spektier pre modulácia 8-QAM je možné vidieť na obrázku 41.



Obrázok 41 - Porovnanie konštelčných diagramov 8-QAM

Postupným vzd'ľaňovaním detektoru od zdroja svetla nastáva čo raz väčší rozkmit symbolov až do chvíle kedy nie je možné virohodne rozlíšiť daný symbol.

Obdobne sú ukázane výsledky v grafe - obrázok 42 pre nosnú frekvenciu 2,5 MHz so šírkou pásma 1400 kHz.



Obrázok 42 - Závislosť BER na vzdialenosti

Tu je dobré si všimnúť ako nosná frekvencia podstatne ovplyvnila dosah komunikácie. 4-QAM dosiahlo o 10 metrov nižší dosah spolu aj s 8-QAM. Za prítomnosti nosnej frekvencie 2,5 MHz nebolo možné s 64-QAM komunikovať ďalej ako na 5 metrov. Táto komunikácia sa dá považovať za nepoužiteľnú a zbytočnú keďže nedokážeme využiť jej teoretickú šírku pásma 5000 kHz.

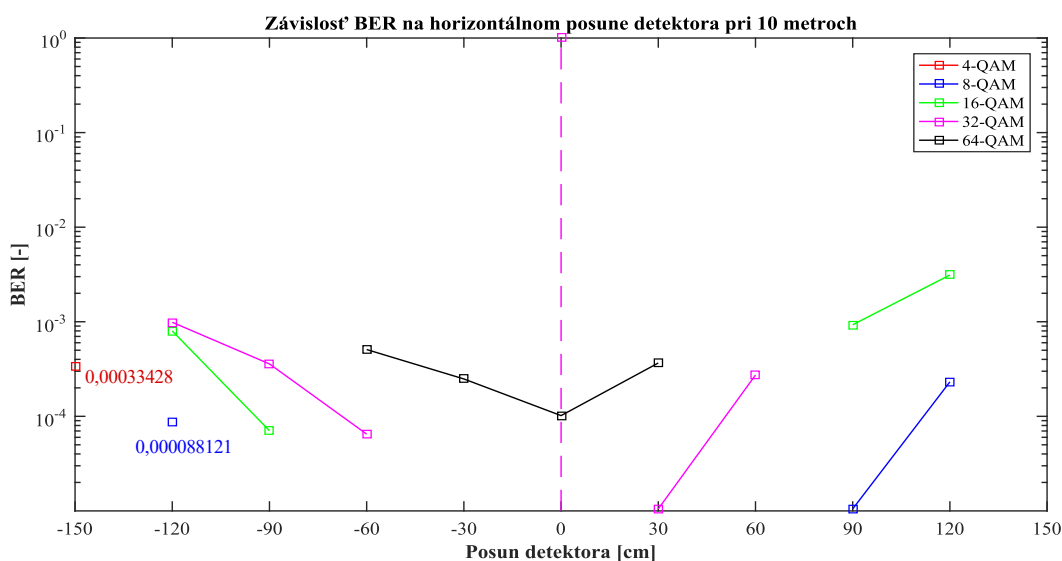
Tabulka 1.14: *Chybovosť 16-QAM*

16-QAM		5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
Šírka pásma [kHz]	Nosná frekvencia [MHz]	BER	BER	BER	BER	BER	BER
1000	1	0	0	0	0	0	0,001808
2000	1	0,000231	0,000362	0,000483	0,000956	0,004166	
1000	1,5	0	0	0	0	0,000053	0,005737
2000	1,5	0	0	0	0,000121	0,003019	>0,001
3000	1,5	0,001238	0,001741	0,005424	>0,001	>0,001	>0,001
1000	2	0	0	0	1,01E-05	0,001087	>0,001
2000	2	0	0	0,000101	0,001751	>0,001	>0,001
3000	2	0,000151	0,000594	0,008262	>0,001	>0,001	>0,001
1000	2,5	0	0	0	0,006915	>0,001	>0,001
2000	2,5	0	0	0,000976	>0,001	>0,001	>0,001
3000	2,5	0,000191	0,002244	>0,001	>0,001	>0,001	>0,001

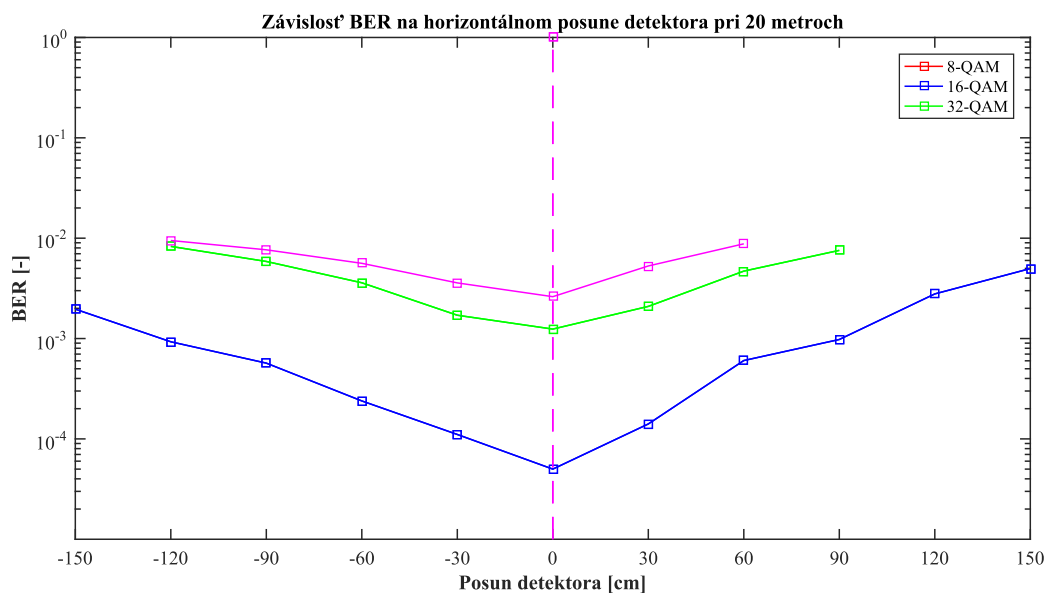
Prehľad určitých dosiahnutých výsledkov sú pre 16QAM sú zobrazené v tabuľke 1.14. Podrobnosti o ostatných moduláciách a frekvenciách je možné nájsť v Prílohe I.

5.1.3 Horizontálny posun

V tejto kapitole popíšem chovanie komunikácie pri ktorej sa detektor posúval mimo priamej viditeľnosti a teda svetlo už nebolo priamo koncertované za pomoci čočky na aktívnu plochu detektora. Detektor sa voči zdroju svetla posúval po 30 centimetroch do oboch strán na maximálnu vzdialenosť 1,5 m. Pre graf – obrázok 43 a obrázok 44 je spoločná nosná frekvencia 1,5 MHz a šírka pásma 1400 kHz avšak pri rozdielnych vzdialenostiach.



Obrázok 43 – Horintálny posun pri vzdialenosti 10 metrov



Obrázok 44 - Horintálny posun pri vzdialenosti 20 metrov

Je dobre si všimnúť rozdielnu metriku BER medzi grafmi. Podstatne lepšie výsledky možno vidieť na vzdialenosti 20 metrov čo sa týka posunu. To z dôvodu vyžarovacej charakteristiky svetlometu. Na väčšiu vzdialenosť dokáže svetlomet viac rozptýliť svetlo a tak je možné komunikovať aj mimo priame ohnisko čočky detektora. Na detektor teda dopadá nižšia intenzita svetla a tak možno očakávať nárast chybovosti. Chybovosť, ako vidno v grafoch, stúpala viac s posunom vpravo. To odpovedá vyžarovacej charakteristike v kapitole

4. Ide teda o pravý svetlomet ktorý má smerovať viac svetla pred auto ako mimo neho. Mohlo by totiž dochádzať k oslňovaniu oproti idúceho auta.

Na vzdialenosti 20 m je nemožno komunikovať od 16-QAM a vyššie ani napriamo pri danej konfigurácii. Ide o ukážku ako vplýva posun detektora na komunikáciu. Pri vzdialenosti 10 metrov je problém pri hraniciach posunu (1,5 m) kedy svetlo vyžiarené do priestoru nemalo dostatočný vyžarovací uhol. Na druhej strane za to môže aj samotná čočka detektora ktorá toto svetlo lami mimo aktívnu plochu detektora. Tabuľka 1.15 zobrazuje chybovosť pri nosnej frekvencii 1,5 MHz a šírke pásma 1400 kHz na vzdialenosť 5 metrov.

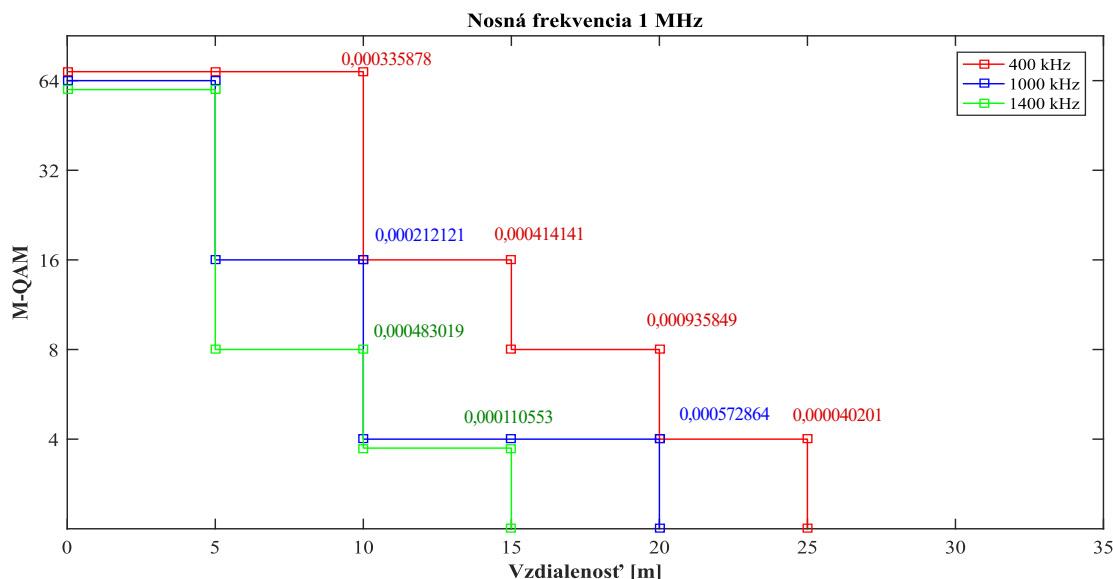
Tabuľka 1.15: Chybovosť v závislosti na horizontálnom posune

Parametre	Poloha				
M-QAM	-60 (BER)	-30 (BER)	0 (BER)	30 (BER)	60 (BER)
4	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
16	0,000020202	0	0	0	0
32	0,000232911	0	0	0	0,000111
64	0,00318884	0,0000508906	0,0000407125	0,0000203562	0,003577811

Pri tejto vzdialenosti nastal pri každej konfigurácii úplný rozpad spojenia nad posun 60 cm do oboch strán. Za čo už môžu vyššie uvedené dôvody.

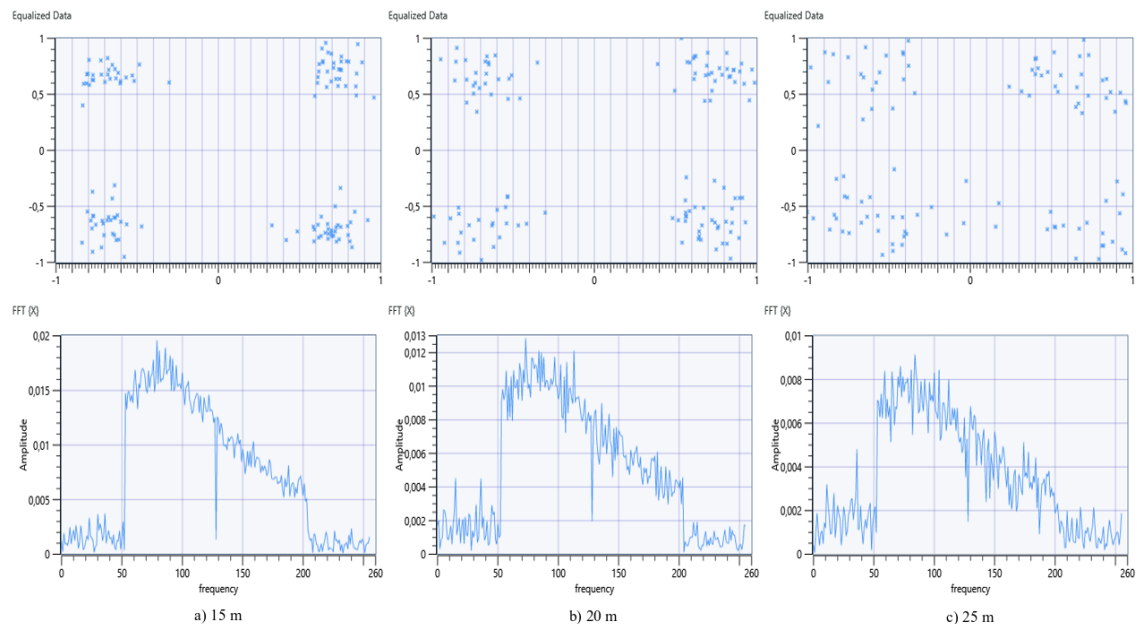
5.2 Zadný svetlomet

LED brzdomer bola napájaná 13,5 V. Toto svetlo, ako vysielateľ, dosahovalo v porovnaní s predným svetlometom podstatne horšie výsledky. Horšie zvládalo či už vyššiu šírku pásma alebo nosnú frekvenciu tak aj vyššie modulačné formáty.



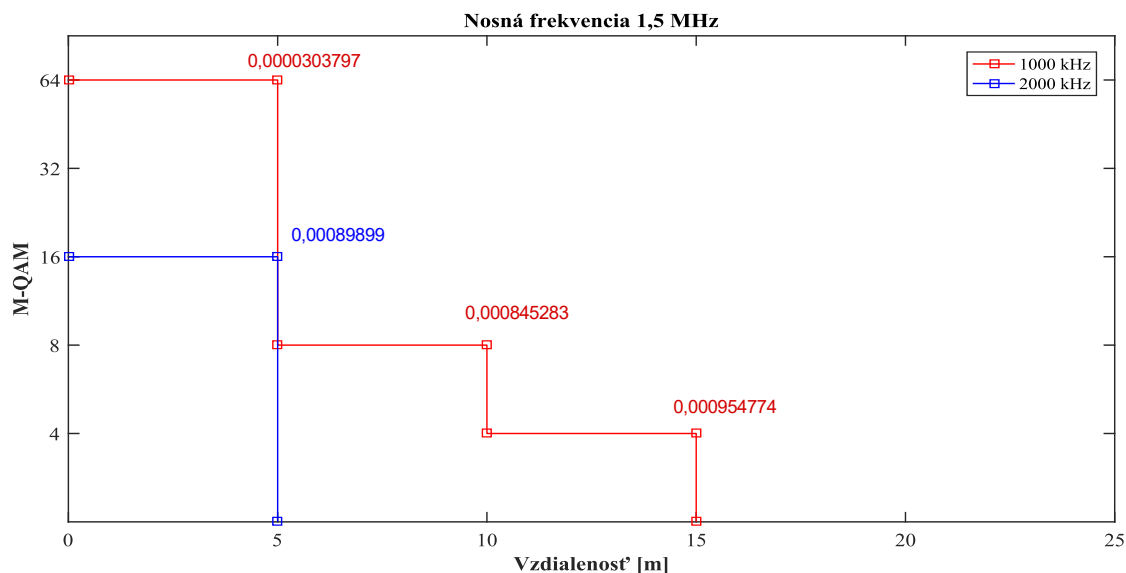
Obrázok 45 - Limity pre rôzne šírky pásma

Obrázok 45 popisuje limity pre nosný kmitočet 1 MHz. Tu je možné vidieť ako šírka pásma vplýva na dosiahnuteľnú vzdialenosť. Modulácia 64-QAM fungovala maximálne na 10 metrov, potom bola pre komunikáciu nepoužiteľná.



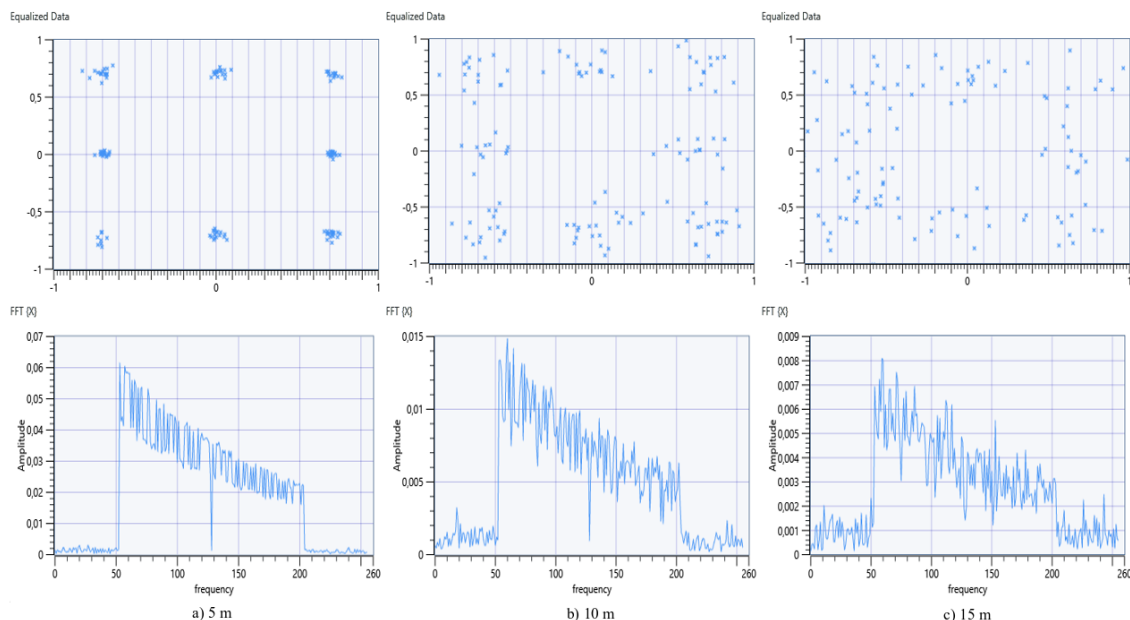
Obrázok 46 – 4-QAM porovnanie

Obrázok 46 popisuje 4-QAM moduláciu pri šírke pásma 1000 kHz na nosnom kmitočte 1 MHz. Tu môžete vidieť klesanie kvality signálu na základe vzdialenosti zdroja a detektora.



Obrázok 47 - Limity pre rôzne šírky pásma

Na obrázku 47 je zas vidieť limity pre nosný kmitočet 1,5 MHz. Pri porovnaní obrázku 45 a 47, kedy sa berie do úvahy šírka pásma 1000 kHz je vidieť ako dosiahnuteľná vzdialenosť je o 5 metrov menšia. Nosný kmitočet 2 MHz a vyššie fungoval ešte horšie čo týka vzdialenosti. Viac v Prílohe I.

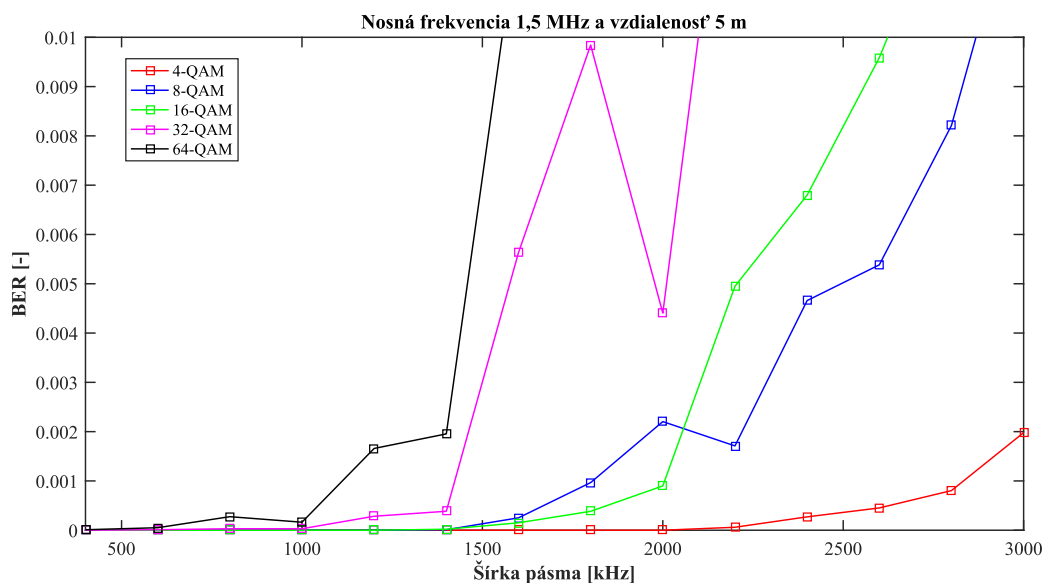


Obrázok 48 – Porovnanie 4-QAM na rozličných vzdialenostiach

Modulácia 8-QAM dosiahla na tomto kmitočte dosiahla 10 metrov. Na vzdialenosti 15 metrov bola chybovosť väčšia ako 0,001 a konšelačný diagram obsahoval symboly, ktoré nebolo možné správne rozoznať. Vyobrazenie primaného signálu na základe vzdialenosti je na obrázku 48.

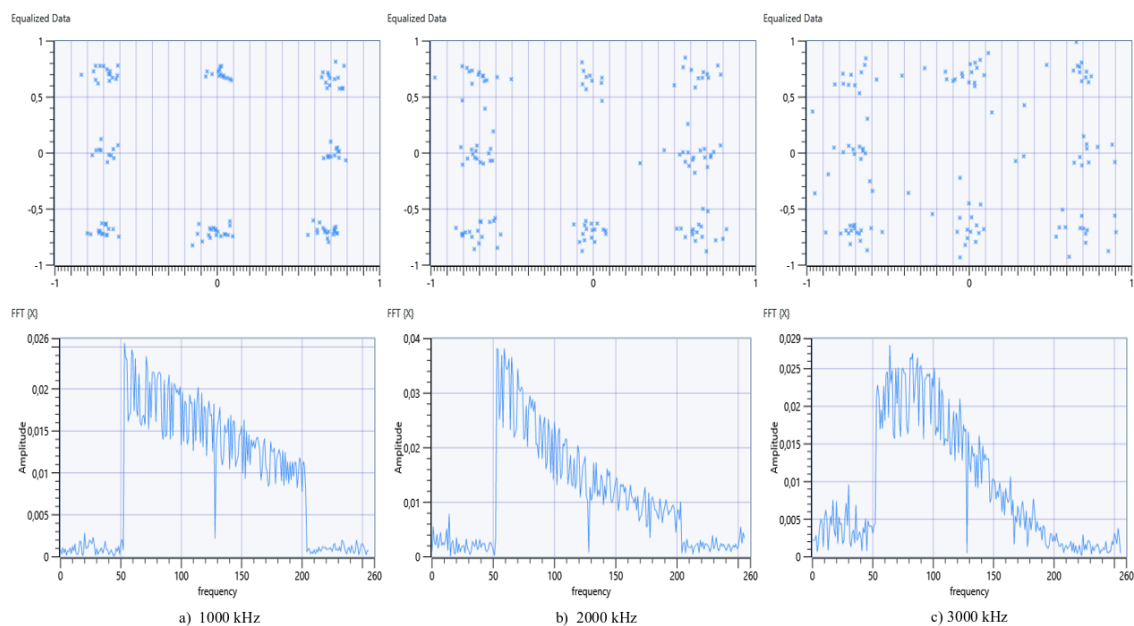
5.2.1 Šírka pásma

Pri nosnej frekvencii 1,5 MHz ešte ostanem. Obrázok 49 popisuje závislosť šírky pásma pri rozdielnych QAM moduláciách na tejto frekvencii. Tu je vidieť ako šírka pásma 3000 kHz, teda celé pásmo tohto kmitočtu je pre komunikáciu nepoužiteľne keďže ide o vzdialenosť 5 metrov kedy výsledky sú najlepšie.



Obrázok 49 – Závislosť šírky pásma

Pre zadný svetlomet budem teda považovať ideálnu šírku pásma menšiu ako 2000 kHz. Pri tejto šírke je taktiež dôležitý rad modulácie na ktorý je aplikovaná.

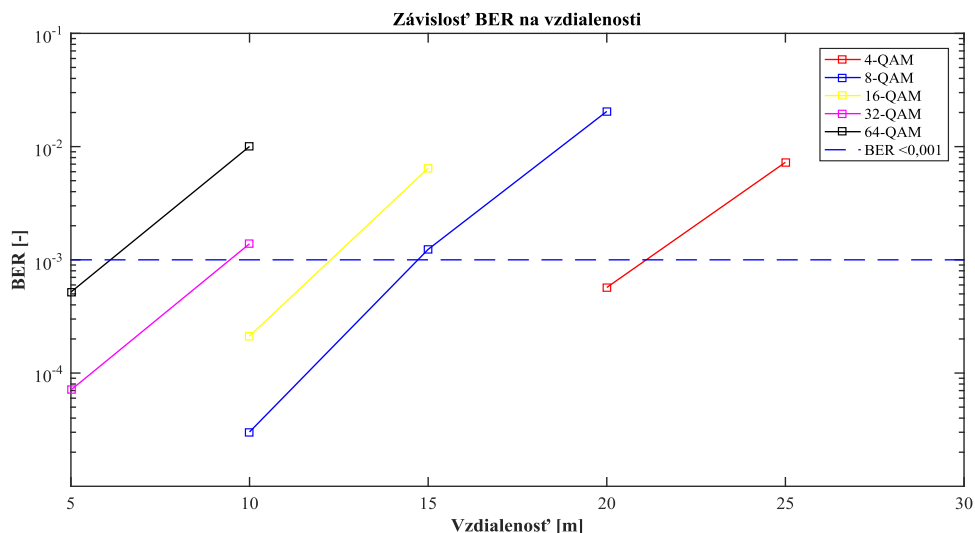


Obrázok 50 – Porovnanie prímaného signálu 8-QAM pri rôznych šírkach

Na obrázku 50 je vidieť ako šírka pásma vplýva na kvalitu prijímaného signálu. Pri maximálnej šírke tejto frekvencie malo za následok skreslenie spektra kedy horná hranica splynula so šumom. To malo vplyv na samotnú chybovosť.

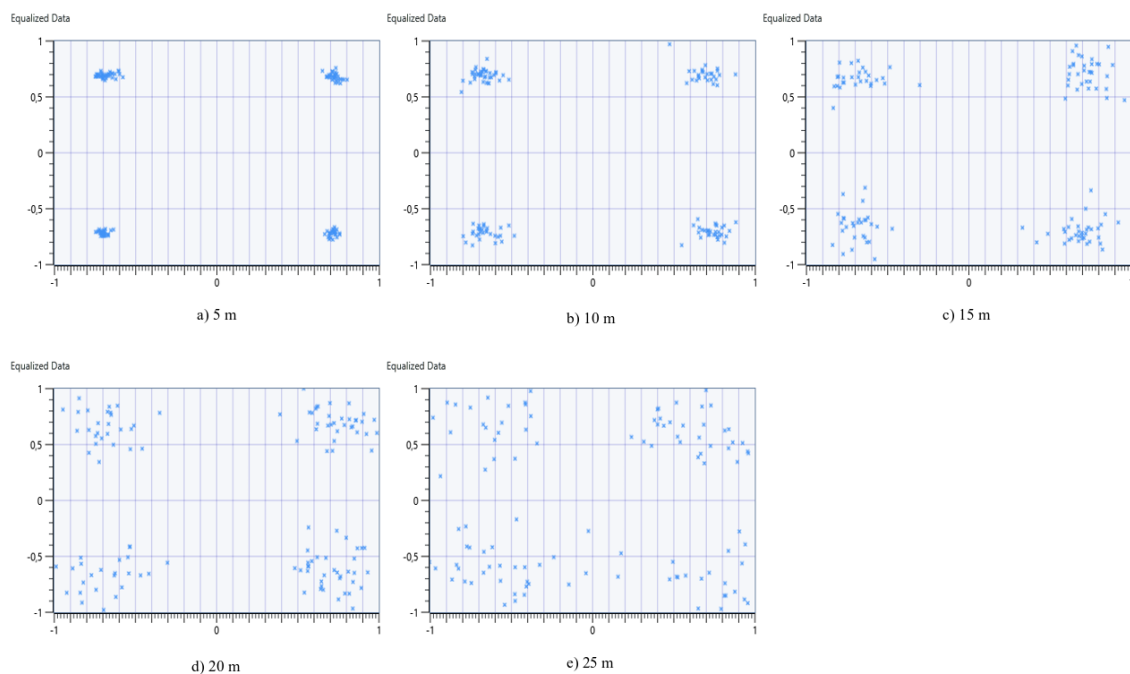
5.2.2 BER vs vzdialenosť

Keďže niesom schopný využiť celú šírku pásma 1,5 MHz vraciam späť na nosný kmitočet 1 MHz. Tu som vzal do úvahy dosah komunikácie a vyniesol chybovosť voči vzdialenosti na šírke pásma 1000 kHz pre jednotlivé rady QAM. Do obrázku 51 som zapisoval nenulové hodnoty.



Obrázok 51 – Závislosť BER na vzdialenosti

Ako som už vyššie spomenul toto svetlo nezvládalo vyššie rady modulácie ako je napríklad 64-QAM. Ta bola použiteľná iba na 5 metroch pri daných parametroch.

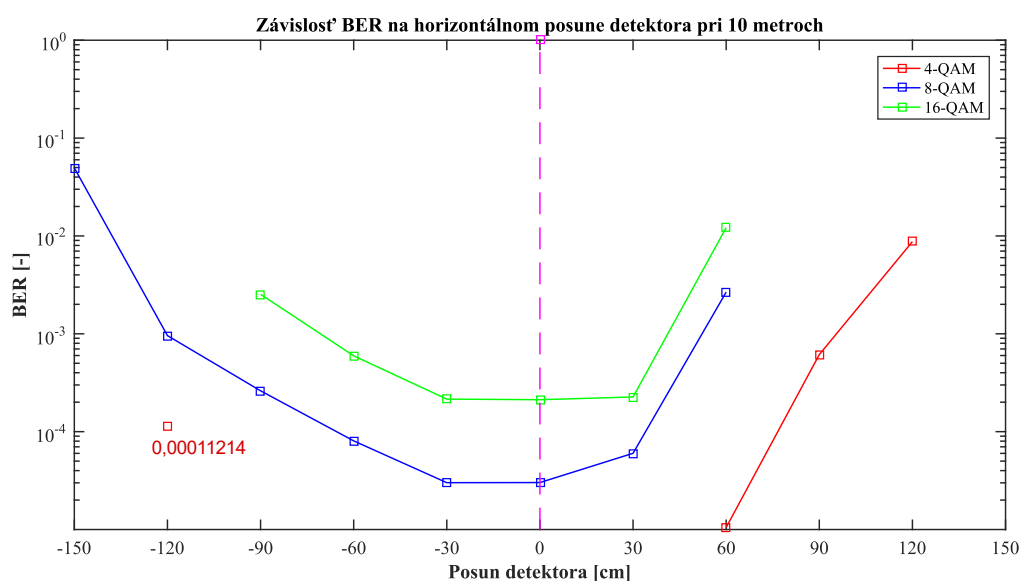


Obrázok 52 – Porovnanie 4-QAM pri rôznych vzdialenostiach

Pre lepší prehľad ako sa správa signál pri rôznych vzdialenostiach som vybral 4-QAM moduláciu ktorá je zobrazená na obrázku 52.

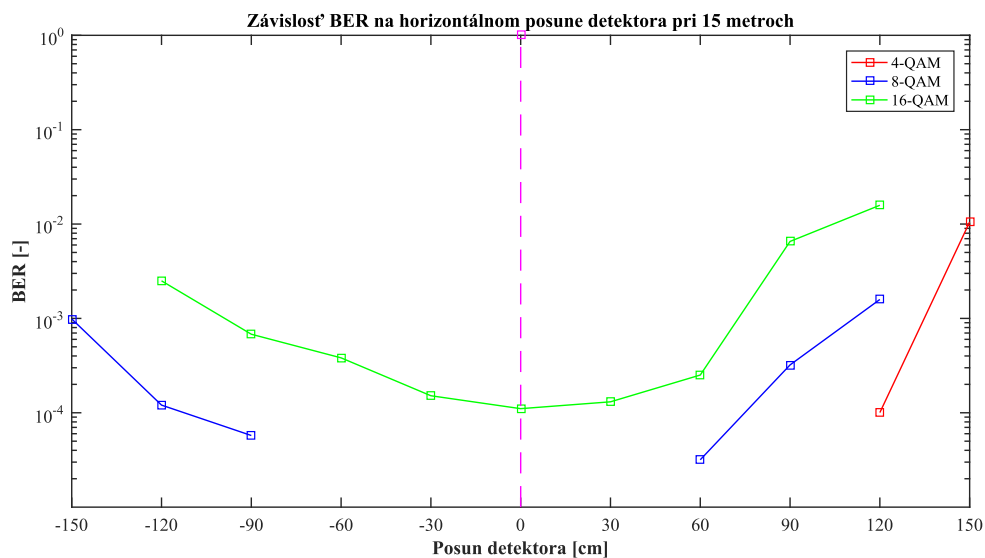
5.2.3 Horizontálny posun

Toto svetlo som tak isto podrobil meraniu horizontálneho posunu detektora. Pri porovnaní horizontálnych posunoch predného a zadného svetlometu na 10 metrov je možné si všimnúť že smerová charakteristika v rovine C0/90 je užšia. Brzdové svetlo má v aute informačný charakter totiž neslúži primárne ako osvetľovacia funkcia. Graf - obrázok 53 a obrázok 54 je vyobrazenie chybovosti na nosnom kmitočte 1 MHz a šírke pásma 1000 kHz pri rôznych vzdialenostiach aj posune detektora.



Obrázok 53 - Horizontálny posun pri vzdialenosti 10 metrov

Tu je možné vidieť ako sa komunikácia správa kde sa svetlomet nenachádza v ohniskovej pozícii voči detektoru. Čočka ktorá je umiestnená na detektore so stúpajúcim posunom koncentruje menej svetla na aktívnu plochu detektora a tým rastie chybovosť.

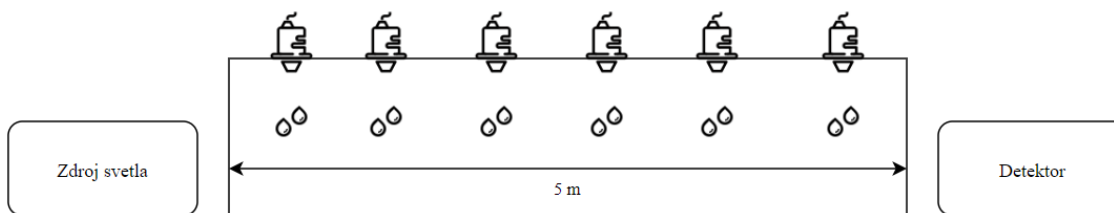


Obrázok 54 - Horintálny posun pri vzdialenosti 15 metrov

Čím ďalej sa nachádza detektor od zdroja tým má svetlo schopnosť sa lepšie rozložiť v priestore a dovoliť komunikáciu pri väčších posunoch. Tu je však táto komunikácia obmedzená samotným dosahom daného svetlometu.

6 Vplyv dažďu

Pre merania dažďu bol použitý box z polycarbonatu z rozmiery 50x50x500 centimetrov. Zhora na box bola umiestnená kovová konštrukcia s tryskami na rozprašovanie vody. Tieto trysky boli napojené cez hadičky do čerpadla na vodu ktorý do nich tlakoval vodu. Na čerpadle bol merač prietoku vody ktorý bol obsluhovaný za pomoci aplikácie v LabView na počítači. Umožňoval riadenie ventilu, ktorý bol medzi čerpadlom a tryskami a dalo s ním riadiť obsah vody prechádzajú cez. Schému je možné vidieť na obrázku 55.



Obrázok 55– Schéma merania dažďu

Trysky vyrába spoločnosť Pentrair s ich výrobné označenie je 90B2FP6.5. Tie boli pomerne malé a simulovali jemný dažď s malými dažďovými kvapkami ale za to s veľkým počtom.

Pre meranie vplyvu bol otvor ventilu nastavený na maximálny možný priechod. V tom prípade bol prietok vody 9,206 l vody za minútu. To mi pomohlo vypočítať zrážky ktoré sa dajú prirovnať k reálnemu počasiu. Zrážku h môžeme vypočítať ako:

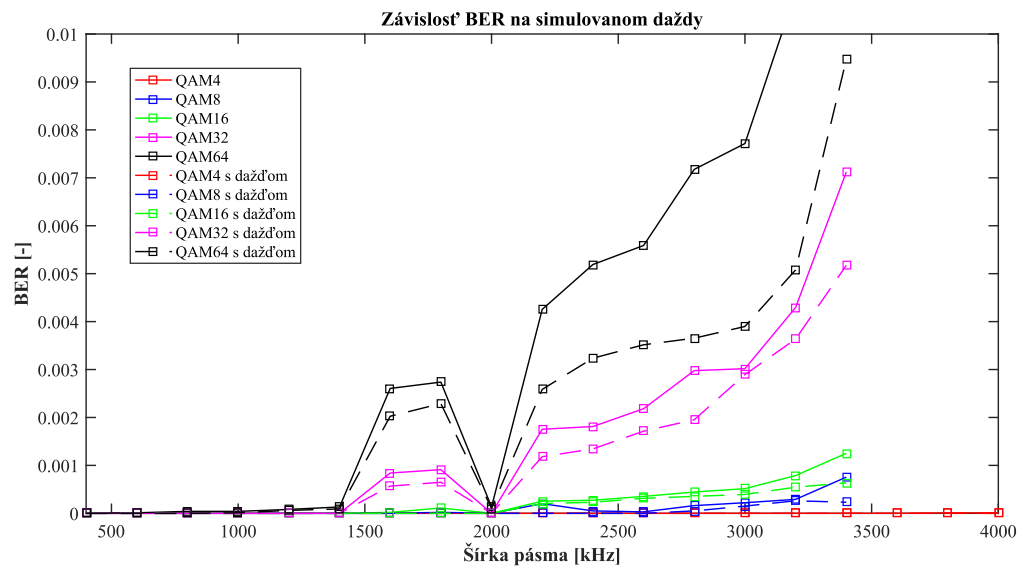
$$h = \frac{V}{sl} \quad (6.1)$$

,kde s je šírka boxu a l je jeho dĺžka. V je množstvo napršanej vody. Vieme že pretok vody je $9,206 \text{ l/min} = 0,55236 \text{ m}^3/\text{h} = 552,236 \text{ mm}^3/\text{h}$. Po dosadení do vzorca vyjde veľkosť zrážok $220,944 \text{ mm/h}$. To odpovedá jemnej búrke.

6.1 Predný svetlomet

Box bol dlhý 5 metrov. Na jeho začiatku bol umiestnený svetlomet a na konci detektor. Referenčná hodnota bola meraná znova keďže výsledky dosiahnuté na 5 metrov z hlavného merania nedopovedali tým ktoré som dosiahol na boxe. A to z dôvodu samotnej konštrukcie. Samotný materiál z ktorého bol tento dutý box vyrobený spôsobuje utlm a aj lom. Čočka nemohla teda pozbierať toľko svetla ako pri meraniach bez neho.

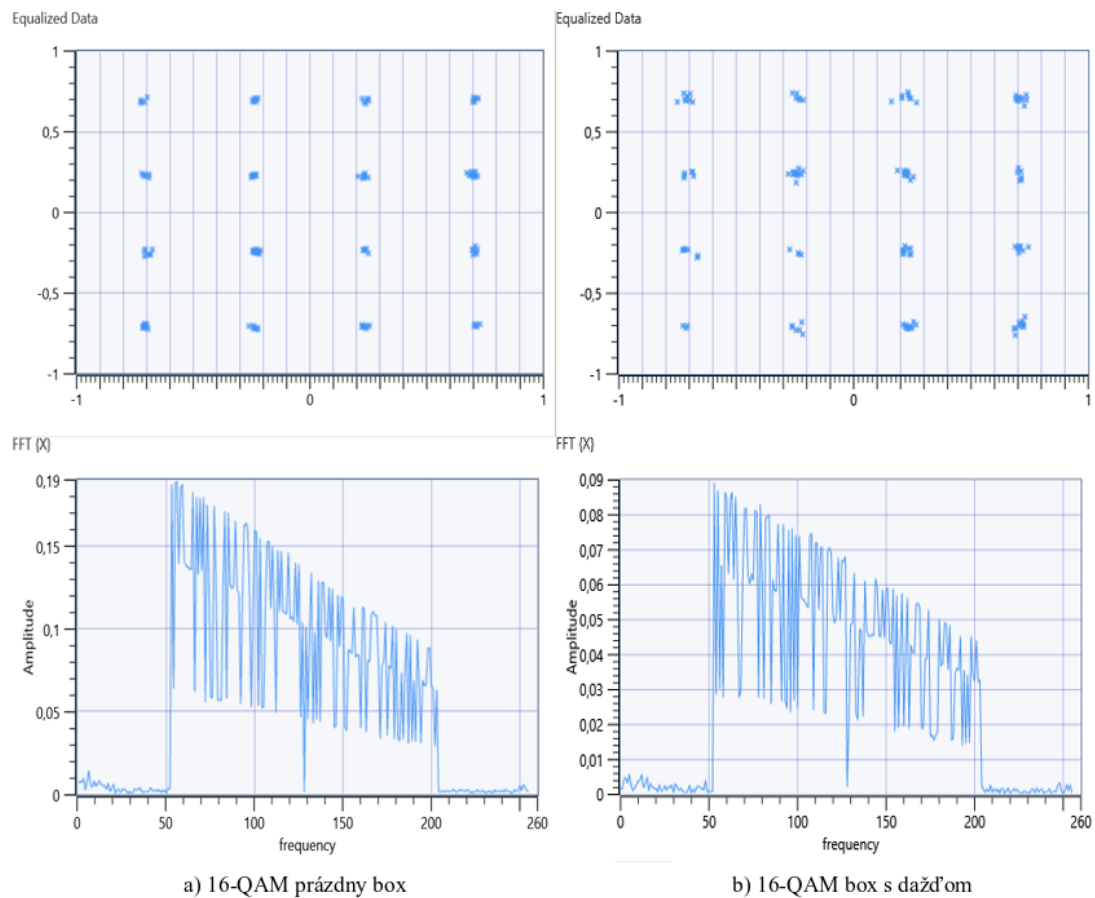
Toto meranie som uskutočnil pri nosnej frekvencii 2 MHz pri rozličných šíriek pásma. Obrázok 56 popisuje chybovosť medzi prázdny boxom (prerušovaná čiara) a dažďom v boxe (plná čiara).



Obrázok 56 – Porovnanie chybovosti pri meraní dažďu

Aj tu je možné vidieť ako niektoré šírky pásma nefungujú (1600-1800 kHz). Ďalšia vec je dážd spôsobuje nárast chybovosti ktorý nie je až taký veľký. Chybovosť pri jednotlivých parametroch neklesla ani o jeden celý rad chybovosti čo znamená že dážd nemá až taký negatívny vplyv na VLC.

Na ukážku som vybral porovnanie dvoch košteláčnych diagramov a spektier 16-QAM pre nosnú frekvenciu 2 MHz a šírku pásma 2000 kHz.



Obrázok 57 – Porovnanie prjimaného signálu 16-QAM

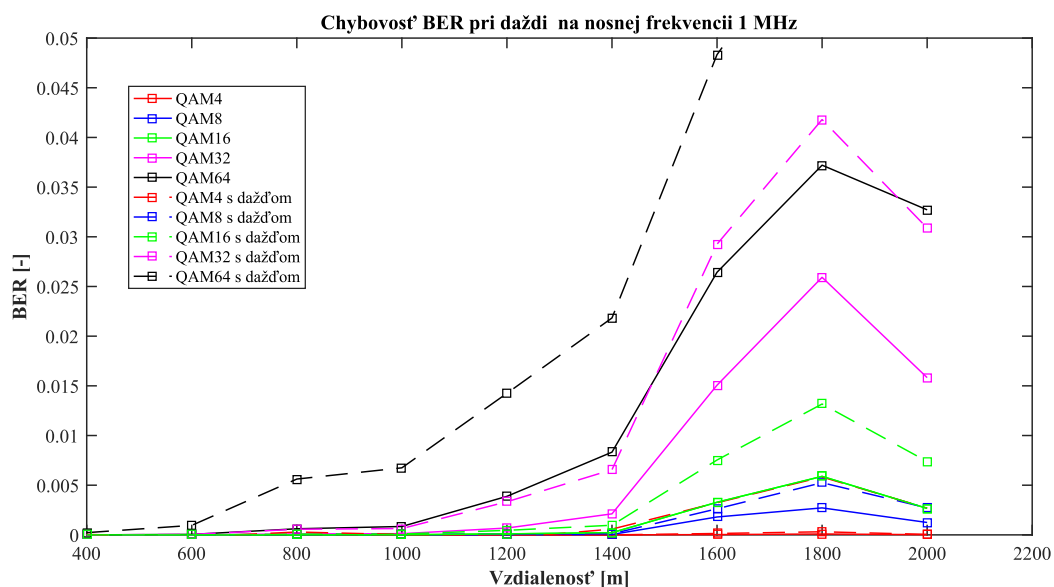
V konšelačných diagramoch vidieť ako jednotlivé symboly u boxu s dažďom majú väčší rozkmit ako prázdny box. To je spôsobené oslabením prijímanej výkonovej úrovne čo je možné vidieť na výsledných spektrách. Kedy relatívna amplitúda klesla približne o polovicu. Tabuľka 1.16 zobrazuje namerané chybovosti pri 16-QAM.

Tabulka 1.16: Porovnanie chybovosti pri meraniach dažďu

Nosná frekvencia	Šírka pásma	Ref. BER	BER
2 Mhz	400 kHz	0	0
2 Mhz	600 kHz	0	1,07E-05
2 Mhz	800 kHz	0	4,07E-05
2 Mhz	1000 kHz	1,02E-05	4,07E-05
2 Mhz	1200 kHz	6,11E-05	8,14E-05
2 Mhz	1400 kHz	9,16E-05	0,000132
2 Mhz	1600 kHz	0,002025	0,002606
2 Mhz	1800 kHz	0,00229	0,002738
2 Mhz	2000 kHz	0,000102	0,000132
2 Mhz	2200 kHz	0,002585	0,004254
2 Mhz	2400 kHz	0,003237	0,005191
2 Mhz	2600 kHz	0,003516	0,005588
2 Mhz	2800 kHz	0,003654	0,007176
2 Mhz	3000 kHz	0,003898	0,007715
2 Mhz	3200 kHz	0,005079	0,01087
2 Mhz	3400 kHz	0,009466	0,013038

6.2 Zadný svetlomet

Obdobné pozície zdroja a detektora boli použité aj pre zadný svetlomet. Zadné svetlo dosahovalo podstatne horšie výsledky už pri samotnom hlavnom meraní. Tu je rozdiel medzi prázdny boxom a dažďom o niečo väčší. Svetlomet bol testovaný pre rozdielne šírky pásma na nosnom kmitočte 1 MHz. Obrázok 58 popisuje rozdiely pre jednotlivé QAM.



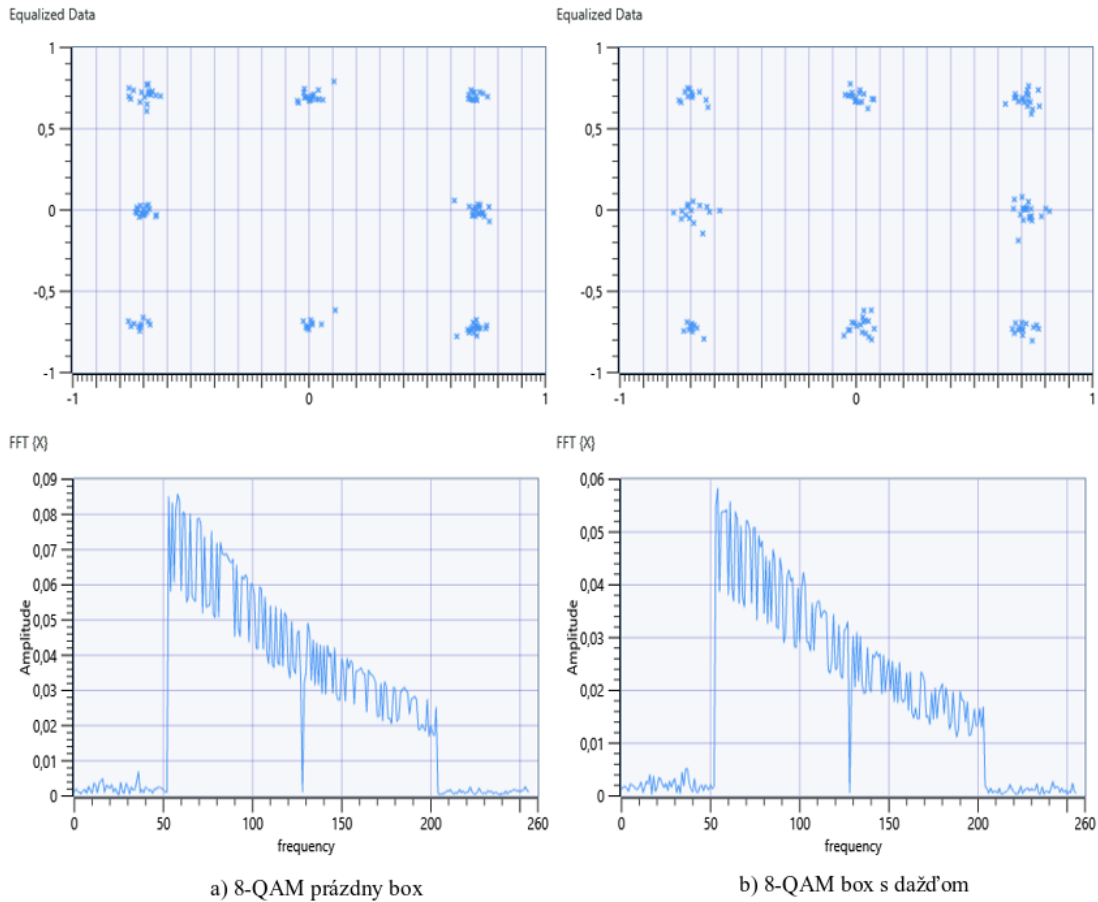
Obrázok 58 – Porovnanie chybovosti pri meraní dažďu

Prerušovanou čiarou sú zobrazené výsledky v počas ktorých bol dážď v boxe. V tabuľke 1.17 je možné vidieť chybovosť 8-QAM modulácie medzi prázdny boxom a boxom s dažďom.

Tabuľka 1.17: *Chybovosť 8-QAM modulácie*

Nosná frekvencia	Šírka pásma	Ref. BER	BER
1 MHZ	400 kHz	0	0
1 MHZ	600 kHz	0	0
1 MHZ	800 kHz	0	0,0000100629
1 MHZ	1000 kHz	0	0,0000500629
1 MHZ	1200 kHz	0,0000100629	0,0000802516
1 MHZ	1400 kHz	0,0000402516	0,000110692
1 MHZ	1600 kHz	0,00180126	0,00262642
1 MHZ	1800 kHz	0,002717	0,00525283
1 MHZ	2000 kHz	0,0012478	0,00271698

Na ukážku ako vyzeral prijatý signál som vybral šírku pásma 1000 kHz. Na daných parametroch sa chybovosť s dažďom dostala na merateľnú chybovosť. Taktiež je možné vidieť pokles amplitúdy medzi nimi v spektrách prijatého signálu.

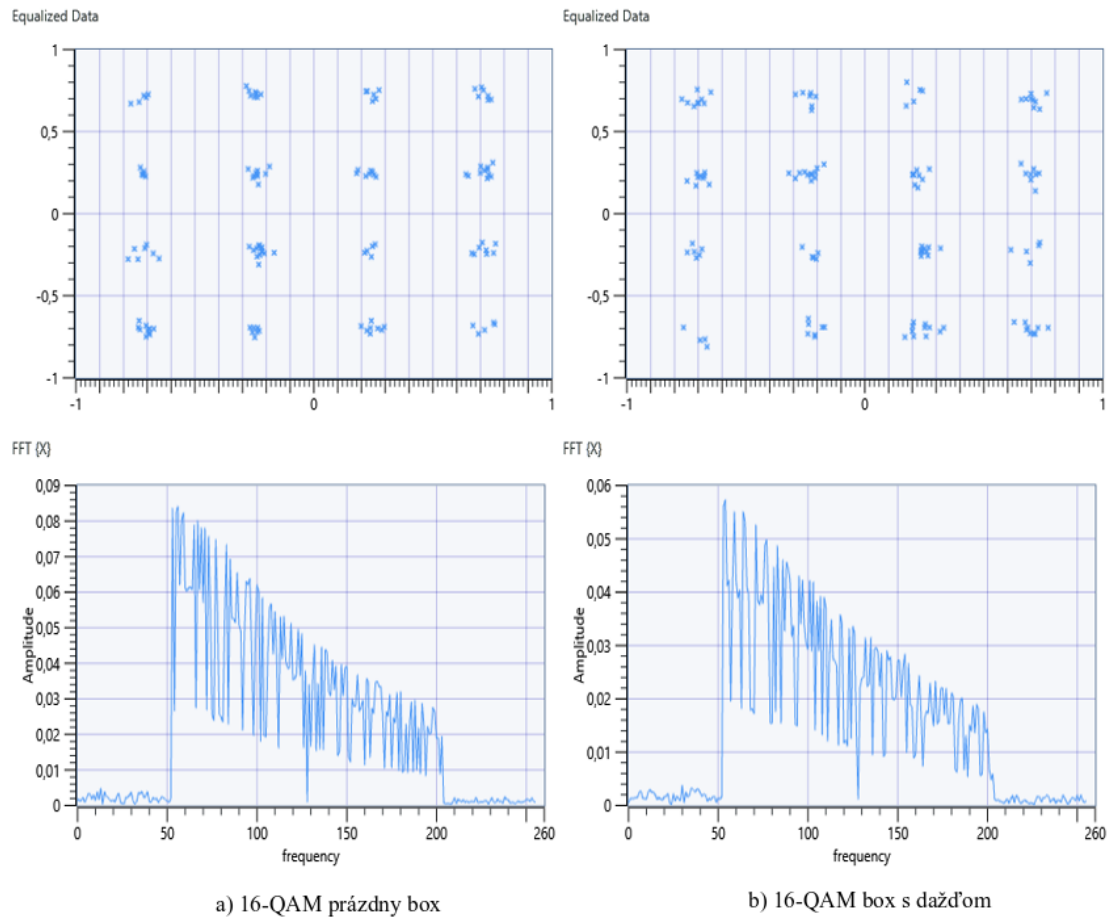


Obrázok 59 – Porovnanie prijímaného signálu 8-QAM

V tabuľke 1.18 ktorá porovnáva chybovosť 16-QAM modulácie je dobré si všimnúť šírky pásma od 1000 kHz. Hodnota chybovosti poukazuje na to že bol prijatý približne dvojnásobný počet chybných bitov pri boxe s dažďom.

Tabuľka 1.18: Chybovosť 16-QAM modulácie

Nosná frekvencia	Šírka pásma	Ref. BER	BER
1 MHZ	400 kHz	0	0
1 MHZ	600 kHz	0	0
1 MHZ	800 kHz	0	0,0000808081
1 MHZ	1000 kHz	0,000010101	0,000090404
1 MHZ	1200 kHz	0,000101	0,000456
1 MHZ	1400 kHz	0,000222	0,00097
1 MHZ	1600 kHz	0,003283	0,007535
1 MHZ	1800 kHz	0,005889	0,013172
1 MHZ	2000 kHz	0,002667	0,007384

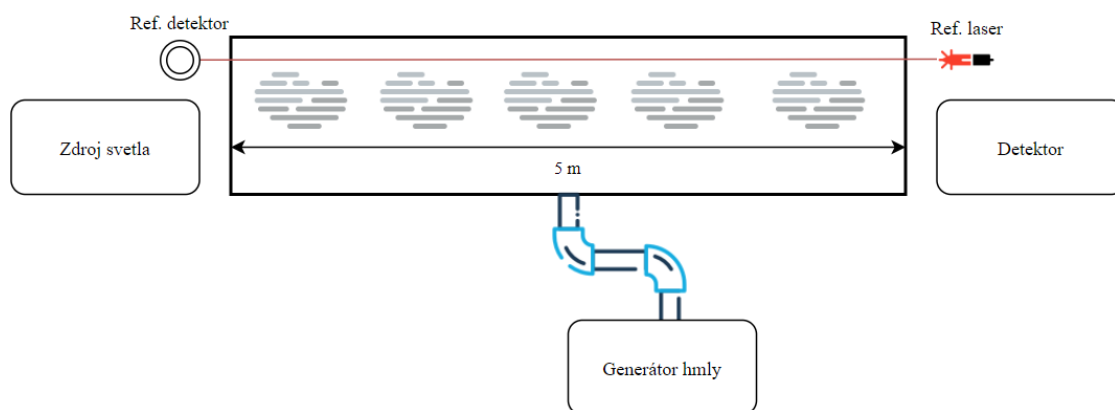


Obrázok 59 - Porovnanie prijímaného signálu 16-QAM

Nevýhoda merania spočíva v dĺžke boxu kedy nebolo možné testovať dosah počas dažďu. Ak by však prijímal dvojnásobný počet chybných bitov je možné čakať výrazný pokles dosahu komunikácie.

7 Vplyv hmly

Pri meraniach hmly bola kovová konštrukcia odobratá z boxu a miesto nej bol umiestnený vonkajší kryt ktorý mal zabrániť uniku hmly. V tomto prípade nejde úplne o hmlu v pravom slova zmysle. Hmla je vodná para s maličkými čiastočkami vody o veľkosti ktorá je zrovnateľná s vlnovou dĺžkou svetla. Ide teda o generovanie suchého dymu. Schéma merania je na obrázku 60.



Obrázok 60 – Schéma merania hmly

Pri meraní hmly bolo umiestnenie zdroja svetla a detektora totožné ako pri merní dažďu. Do spodnej časti boxu bola upevnená rúra z generátora hmly a celý box bol riadne zatesnený aby hmla neunikala ale aby prevažoval samovoľný rozpad. Hustotu hmly nebolo možné merať potrebným príslušenstvom. Preto sa použil výkonný laser ktorý slúži ako referencia. Tento laser prechádzal skrz box a dopadal na fotodetektor. Do boxu bola napustená hmla kedy nastal úplný rozpad a detektor nezachytával žiaden výkon laseru. V tom momente bola prijímaná výkonová úroveň referenčného detektora približne 47 uW. Táto hodnota je optický výkon okoloľného prostredia, inak povedane šum s ktorým budem ďalej počítať.

Postup merania spočíval v odpisovaní chybovosti a prijímanej výkonovej úrovne laseru. Po napustení hmly som čakal kým sa hmla homogénne rozloží v boxe a začne rozpadáť. Potom som postupne odpisoval jednotlivé hodnoty aby som mohol vyniesť chybovosť v závislosti na útlme prostredím.

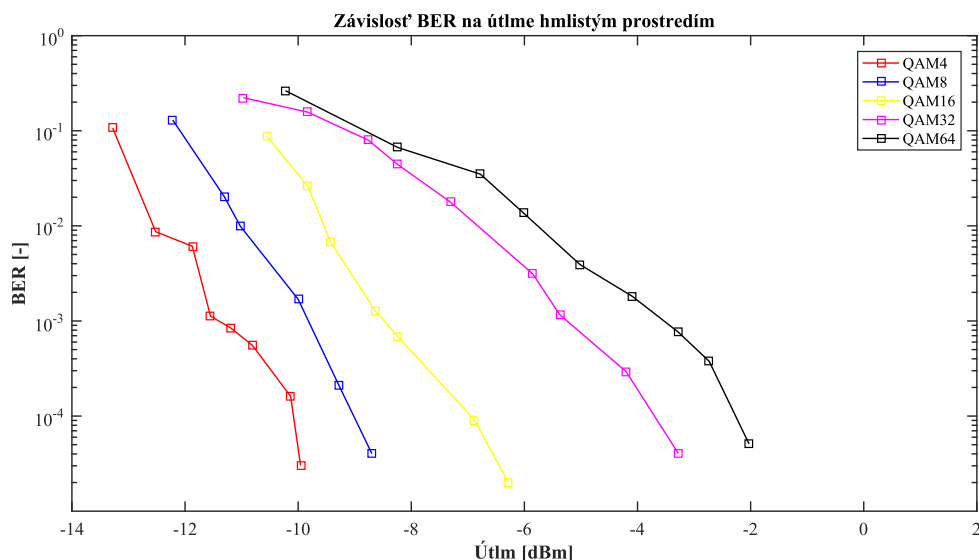
Reálny pohľad na box ktorý sa momentálne napúšťa hmlou je na obrázku 61.



Obrázok 61 – Fotografia boxu napúšťaného hmlou

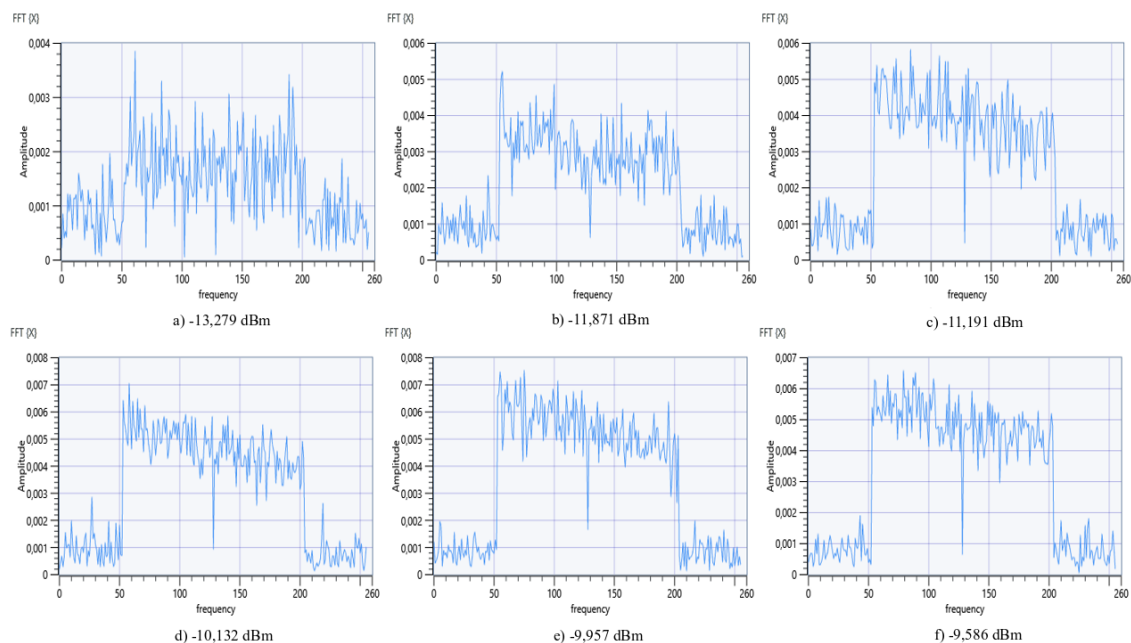
7.1 Predný svetlomet

Keď bol box prázdny tak maximálna hodnota referenčného detektoru bola 5,6 mW. To odpovedá útlmu 7,48188 dBm. Po napustení hmly tento útlm klesol na minimálnu možnú hladinu 47 uW čo je -13,279 dBm. V tom to rozmedzí, počas toho ako sa hmla postupne rozpadá a útlm klesá som zapisoval hodnoty. Ako nosnú frekvenciu som zvolil 2 MHz pre dva tipy šírky pásma 1000 a 2000 kHz. Prvý graf so šírkou pásma 1000 kHz je možné vidieť na obrázku 62.



Obrázok 62 – Priebeh chybovosti závislý na rozpade hmly

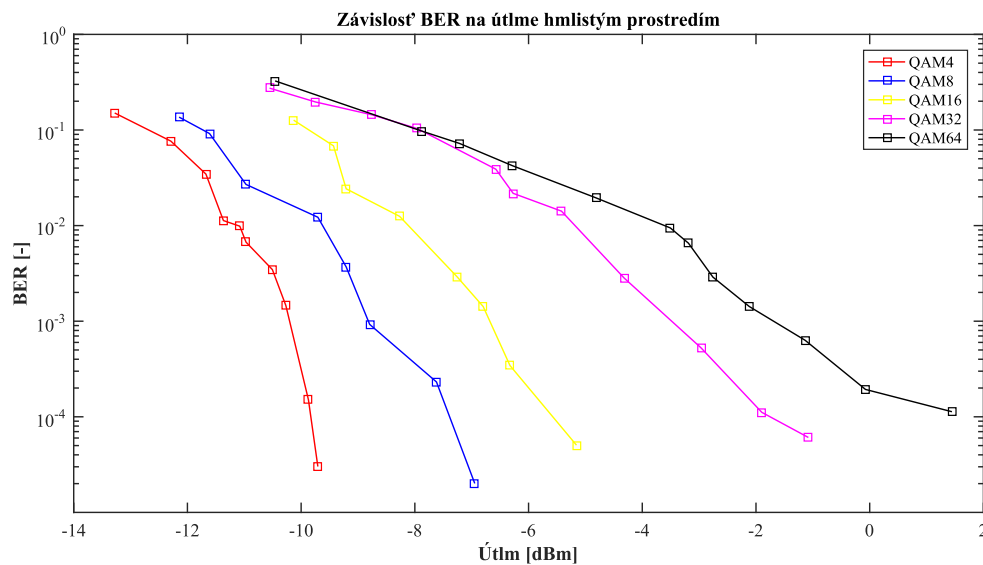
Pri danej konfigurácii nebolo za potreby aby sa box kompletne vyprázdnila a dosiahol 0 chybovosť. Škála kedy komunikácia začala prebiehať a dosiahla nulovú chybovosť je veľmi úzka. Modulácia 4-QAM dosiahla nulovú chybovosť okolo -9,5 dBm.



Obrázok 63 – Priebeh prijímaných spektier 4-QAM

Obrázok 63 zobrazuje spektra na jednotlivých úrovniach. Spektrum a) je hraničné spektrum kedy na referenčný detektor nedopadá žiadne svetlo z laseru, iba parazitné svetlo. Chybovosť pri tomto útlme bola 0,106754. Už pri tomto útlme je možné vidieť náznak spektra pri 4-QAM moduláciu pri šírke 1000 kHz. Pri spektre f) už bola chybovosť nulová.

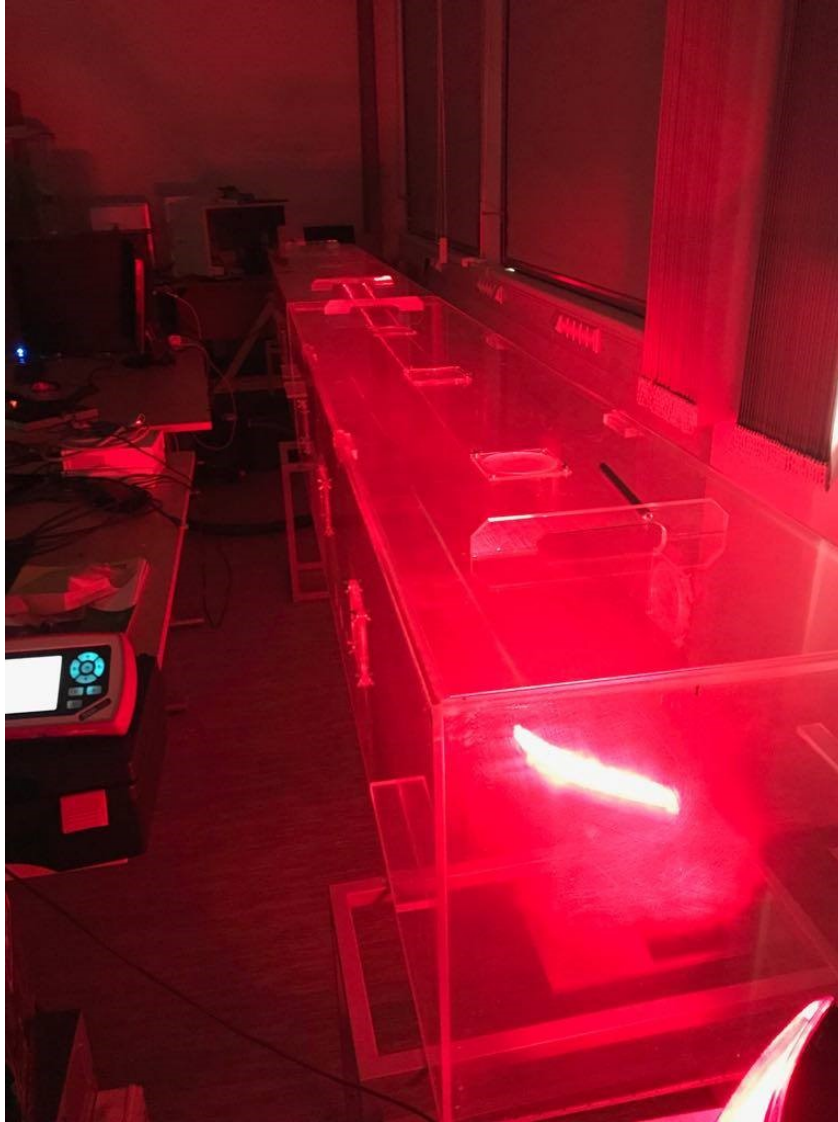
Obdobné testovanie bolo realizované pre šírku pásma 2000 kHz.



Obrázok 64 – Priebeh chybovosti závislý na rozpade hmly

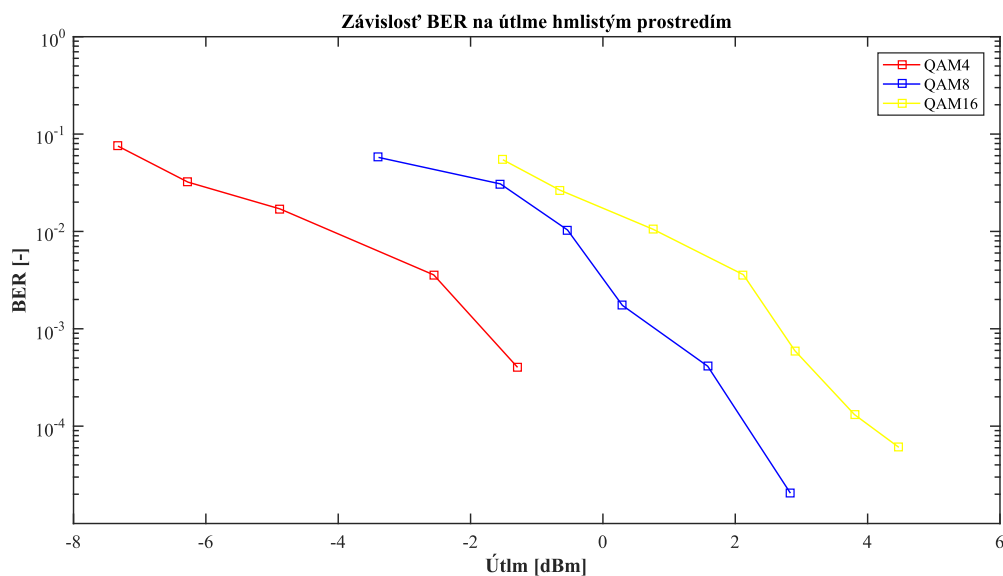
7.2 Zadný svetlomet

Na obrázku 65 je vidieť ako prebieha testovanie komunikácie na atmosférický jav hmly. V boxe, ako je uvedené v úvode tejto kapitoly, je box uzavretý a počas postupného rozpady hmly sa odpisuje hodnota BER a výkon referenčného laseru.



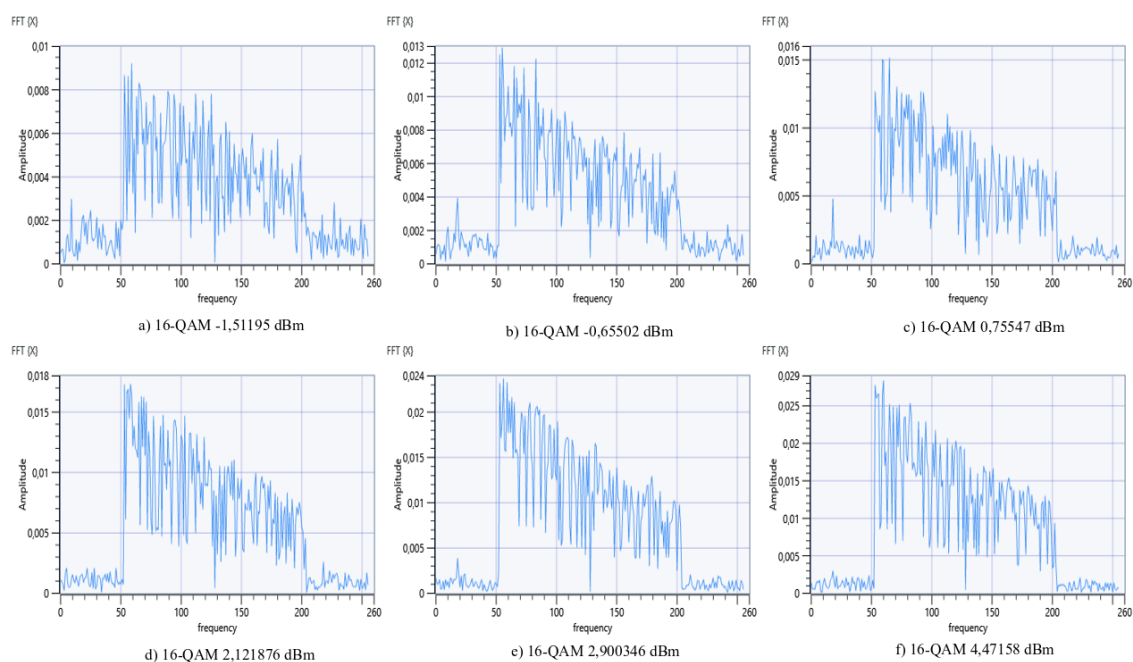
Obrázok 65 – Fotografia boxu napusteného hmlou

Grafy zobrazené v tejto kapitole patria nosnej frekvencii 1,5 MHz a šírke pásma 1000 a 2000 kHz. Hodnoty som opisoval až pokiaľ chybovosť neklesla na referenčnú hodnotu. Na obrázku 66 je chovanie komunikácie na šírke pásma 1000 kHz. V porovnaní s predným svetlometom sa 4-QAM dostala nulová chybovosť až pri výkonovej úrovni -0,4 dBm čo je skoro o 9 dBm viac.



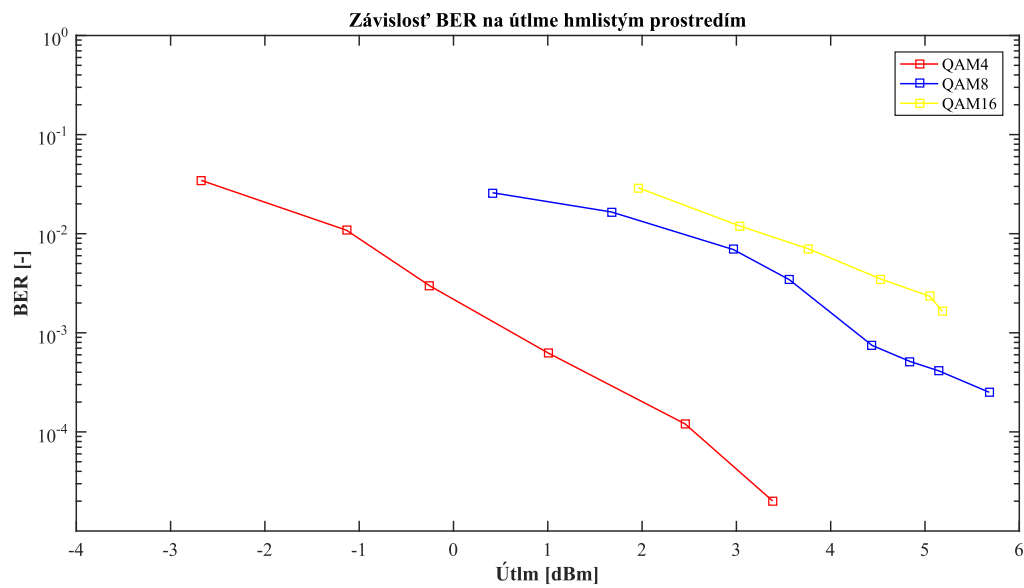
Obrázok 66 – Priebeh chybovosti počas rozpadu hmly

Z obrázku 67 som vybral postupnosť spektier pre 16-QAM modulácia, ktorá zobrazuje tvar signálu na meraných úrovniach priepustnosti hmly.

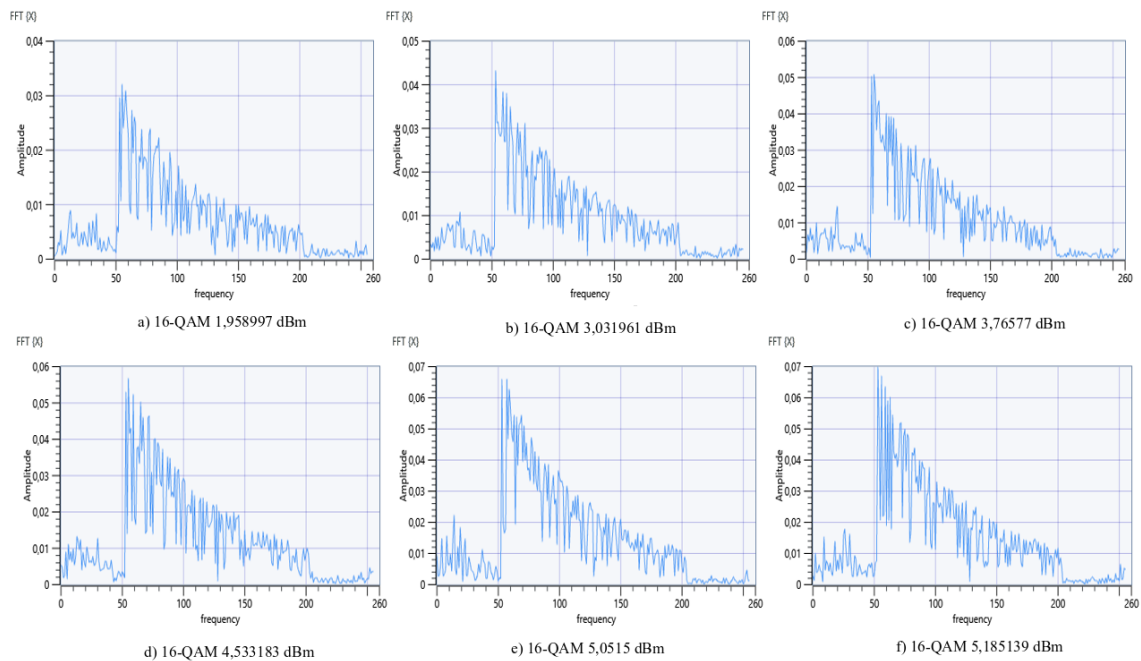


Obrázok 67 – Priebeh prijímaných spektier pri šírke 1000 kHz

Obrázok 68 zobrazuje priebeh chybovosti pre šírku pásma 2000 kHz.



Obrázok 68 – Priebeh chybovosti počas rozpadu hmly



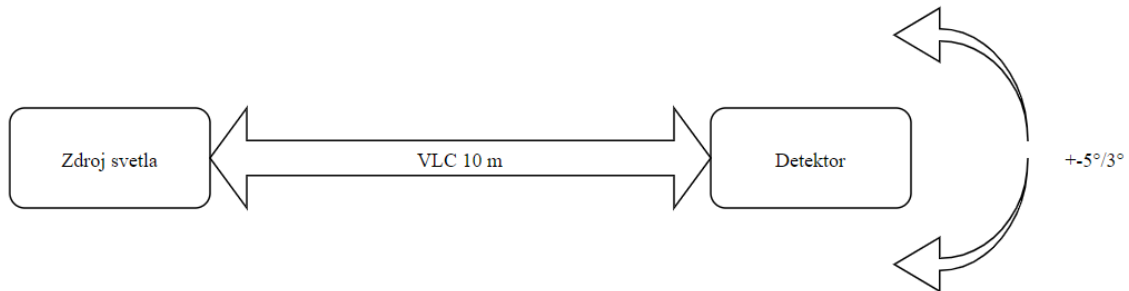
Obrázok 69 – Priebeh prijímaných spektier pri šírke 2000 kHz

Oproti vyššej šírke pásma vidieť na obrázku 69 pokles amplitúdy. Taktiež možno vidieť pri porovnaní spektra f) medzi šírkami pásma že 2000 kHz kanál potreboval nižší utlm prostredí na to aby sa chybovosť dostala na ref. hodnotu.

Hmla je inak povedané Mieov rozptyl. Svetlo sa odráža na mikro časticiach hmly do rôznych smerov a tak sa fotodetektor dopadá nižšia intenzita svetla. Výsledky dosiahnuté počas iných parametrov kanálu nájdete v Prílohe III.

8 Vplyv vibrácií

Pod pojmom vibrácie sú myslené nerovnosti na vozovke ako sú napríklad diery, hrbolce a podobne. Tie sa však veľmi ťažko simulujú v laboratórnych podmienkach a zrovnávajú s reálnymi. Pri meraní bol svetlomet pevne položený na stalo stole a hýbalo s vo vertikálnej ose s detektorom čo popisuje schéma na obrázku 70.



Obrázok 70 – Schéma merania vibrácií

Detektor bol prilepený izolepou na plochu laboratórnej miešačky. Ta umožňovala rôzne nastavenia ako uhol náklonu, rýchlosť trasenia, defaultnú polohu a iné. Na obrázku 71 je možné vidieť toto zariadenie.

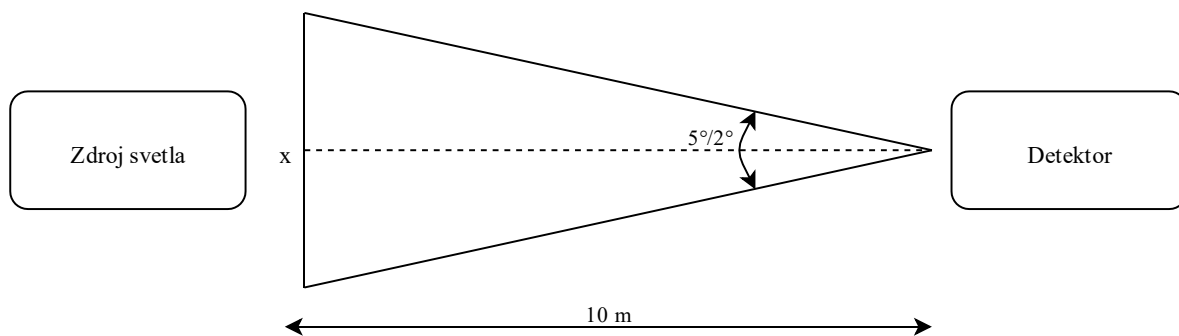


Obrázok 71 – Laboratorna miešačka s detektorom

Pokus som realizoval na vzdialenosť 10 metrov pre oba svetlomety. Parametre miešačky boli nastavené na dva typy konfigurácie a to 20 rpm s rozkmitom 5° a 15 rpm pri 2° .

8.1 Predný svetlomet

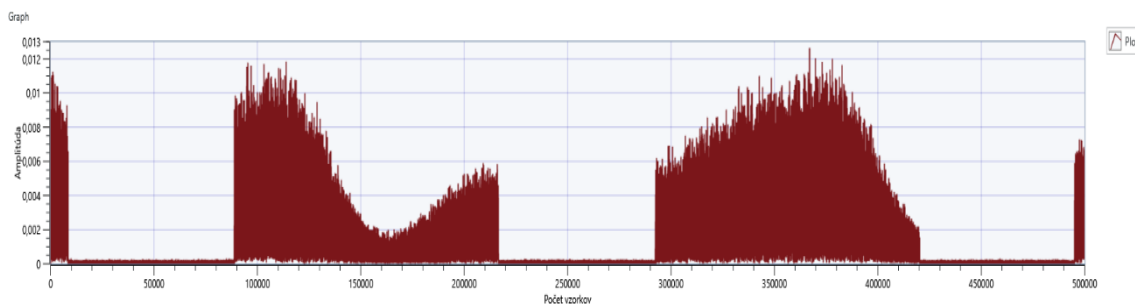
Z obrázku 72 momentálne vypočítam úsečku x ktorá predstavuje rozkmit detektoru.



Obrázok 72 – Natáčanie laboratornej miešačky

Pri naklápaní detektora o 5° voči zdroju svetla je úsečka x dlhá 87,2 cm. Pri aute idúcom v ohniskovej polohe ktoré by znamenalo vychýlenie o 43,6 cm voči maximálnej intenzite. Tento jav sa však ťažko prirovnáva k reálnym vibráciám na ceste.

Ďalším faktorom je rýchlosť vibrácií, inak povedané ako často sa nachádzajú nerovnosti na ceste počas jazdy. To samozrejme ovplyvňuje samotná rýchlosť auta k jednotlivých nerovnostiam. K vysvetleniu pomôžem s grafom – obrázok 73 ktorý reprezentuje krátky časový úsek komunikácie.



Obrázok 73 – Časový priebeh 4-QAM pri šírke 1000 kHz

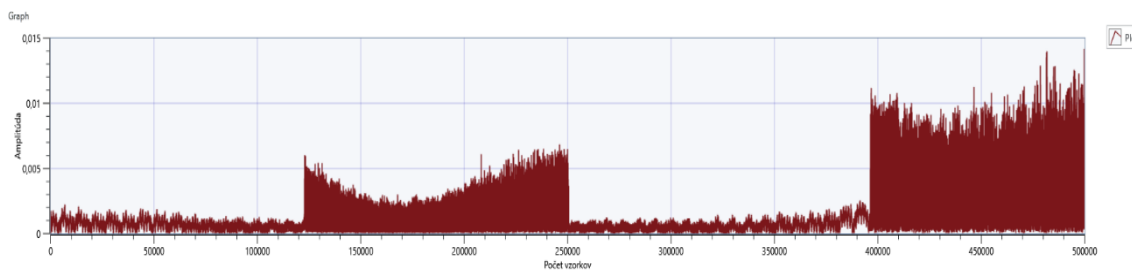
Jedna sa o nosný kmitočet 1 MHz s 1000 kHz pri 4-QAM modulácii. Časový úsek jednej OFDM obálky je približne 127000 vzorkov. Spolu ochranným intervalom tvoria jednu periódu ktorá je 200000 vzorkov. Jedna perióda na 1000 kHz šírke je teda dlhá približne 0,2 sekundy. Tu vidieť jednotlivé výkyvy amplitúdy závislosti na rýchlosti natáčania detektoru.

Rýchlosť natáčania sa na prístroji udáva v otočkách za minútu (rpm). Tento parameter je za potreby vyjadriť v čase lebo rýchlosť kmitania je priamo závislá na uhle v ktorom osciluje. V grafe – obrázok 74 ide o naklápanie 5° s rýchlosťou 20 rpm. Kde možno vidieť dve celé periódy užitočného signálu. Z každej z nich zoberiem bod s najvyššou amplitúdou v samploch za sekundu a vyjadrím ju za pomoci použitej šírky pásma.

V prvej OFDM obálke je navýšia amplitúda na 110000 vzorku kdežto na druhom pri 370 000. Po odčítaní dostanem dĺžku periódy 260 000 vzorkov pre rýchlosť vibrácií. Po vynesení voči šírke pásma ktorá má 1 000 000 vzorkov je to približne 0,26 sekundová perióda.

Auto idúce rýchlosťou 90 km/h čo je v prepočte 25 m/s by tomto prípade natrafilo na necelé 4 nerovnosti (jamy) na vozovke v priebehu jednej sekundy.

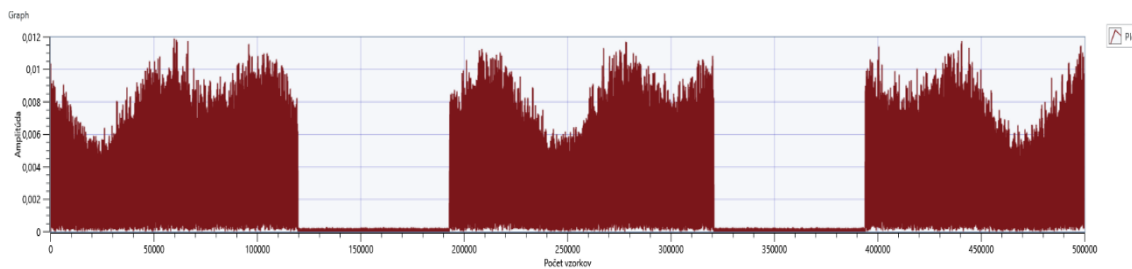
Problém však nastával pri zvyšujúcej sa šírke pásma na 2000 kHz ktorá je krajná pre túto nosnú frekvenciu a obecné pri každej krajnej šírke pásma.



Obrázok 74 – Časový priebeh 4-QAM pri šírke 2000 kHz

Obdobným prepočtom sa dá zistiť že tu by trvala jedna perióda tiež 0,26 sekúnd. Tu však vzniká problém na prijímacej strane kedy medzi užitočnými zložkami signálu sa nachádza interferencia dôsledku použitia maximálnej šírky pásma pre daný nosný kmitočet. Problém je v tom že prijímač má niaku minimálnu detekovatelnú úroveň amplitúdy a v tom to prípade sa dialo že do vyhodnocovania zaberal aj rozkmit nachádzajúci pred užitočným signálom. Čo do merania vnášalo podstatne vyššiu chybovosť.

Ďalšími parametrami vibrácií bolo nastavenie nižšieho uhlu 2° pri 15 rpm. Tu by bolo teoretické vychýlenie 17,45 cm voči maximálnej intenzite a však podstatne častejšia. Z grafu – obrázok 75 vidno priebeh komunikácie pri nosnom kmitočte 1 MHz a šírke pásma 1000 kHz.



Obrázok 75 – Časový priebeh 4-QAM pri šírke 1000 kHz

Pol perioda vibračnej dosky je približne 70 000 vzorkov, tudaš celá 140 000 vzorkov. To znamená že podľa šírky pásma je doba trvania jednej periódy 0,14 sekundy. V reálnom svete by to znamenalo že auto idúce 90 km/h by pocítilo skoro 7 možných nerovnosti v priebehu jednej sekundy a to pri vzdialenosti na 10 metrov.

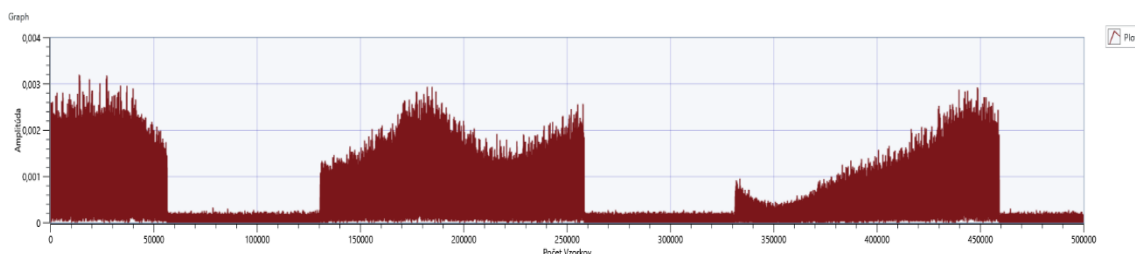
Tabuľka 1.19 popisuje priemerne chybovosti pri daných konfiguráciách.

Tabuľka 1.19: Chybovosť vibrácii pri rôznych parametroch

Nosná Frekvencia [MHz]	Šírka pásma [kHz]	4-QAM		8-QAM		16-QAM	
		BER (5°)	BER(2°)	BER (5°)	BER(2°)	BER (5°)	BER(2°)
1	1000	0	0	0	0	0	0
1	2000	2,01E-04	6,03E-05	nemerateľne	0,002052	nemerateľne	nemerateľne
1,5	1000	0	0	0	0	0	0
1,5	2000	0	0	0	0	0,000616	0
1,5	3000	9,02E-04	4,02E-04	nemerateľne	0,003669	nemerateľne	nemerateľne
2	1000	0	0	0	0	0	0
2	2000	0	0	0	0	0,000263	0
2	3000	0,000121	0,000231	0,00198239	0,000722	0,007566	0,003404
2	4000	0,028	0,001253	nemerateľne	0,008694	nemerateľne	nemerateľne

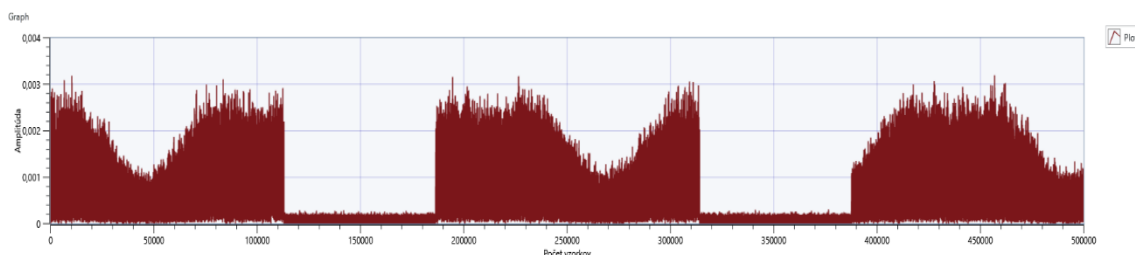
8.2 Zadný svetlomet

Toto svetlo dosahovalo obecné horšie výsledky ako predné. Tak isto sa to prejavilo aj pri meraniach vibrácii. Pri oboch typoch konfigurácie miešačky (5°/20rpm a 2°/15rpm) bolo možné komunikovať len na nízkych kmitočtoch pri nízkom modulačnom formáte. V okolí nosnej 1 MHz a šírke 1000 kHz za použitia 4-QAM bola táto komunikácia možná. Amplitúda užitočného signálu bola dostatočne vysoká na to aby pri vychýlení ohniskovej polohy nedošlo k prekročeniu minimálnej hranice pre spracovanie a signál nesplynul so šumom. Obrázok 76 popisuje priebeh komunikácie pri daných použiteľných parametroch počas konfigurácie miešačky 5°/20rpm.



Obrázok 76 – Časový priebeh 4-QAM pri šírke 1000 kHz

Obrázok 77 zobrazuje priebeh komunikácie počas konfigurácie miešačky 2°/15rpm.



Obrázok 77 – Časový priebeh 4-QAM pri šírke 1000 kHz

Parametre kanálu pre ktorý sa dá považovať komunikácia za prijateľnú boli v okolí 1 MHz . Pri testovaní vyšších frekvencií a vyšších modulačných formátov dochádzalo k úplnému rozpadu komunikácie. Pretože pre vyššie kmitočty a rad modulácie klesá amplitúda užitočného signálu. To má za následok že pri maximálnom uhle natočenia detektoru splynie užitočný signál so šumom a nie je možné ho spracovať. Pokiaľ užitočný signál nezasiahol maximálny uhol natočenia detektora, bol signál spracovaný prijímačom. Tento jav je však stále neprijateľný pre komunikáciu.

9 Zrovnanie laboratórnych podmienok a reálnych

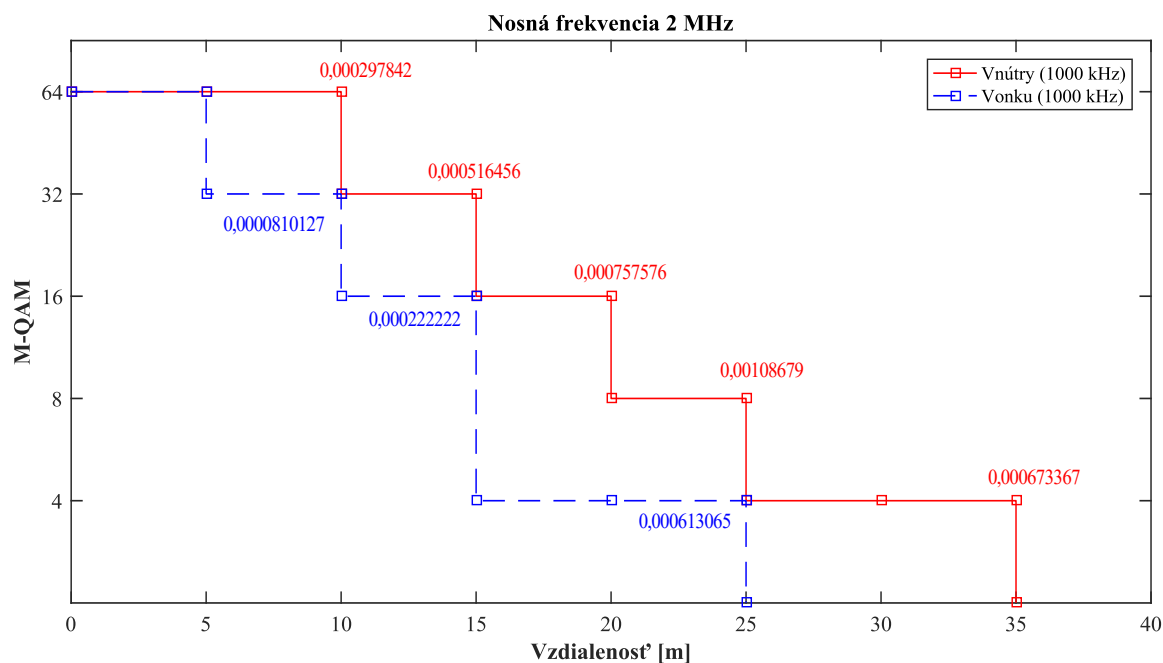
V poslednej fázy došlo k zrovnaniu reálnych podmienok a laboratórnych. Meranie som realizoval na školskom parkovisku za budovou FEI počas letných dní. V obdoby kedy som prevádzkal výskum bolo rôzne počasie . Najhorším prípadom bolo meranie predného svetlometu kedy bola úplne jasne počasie. Na parkovisku bol asfaltový povrch suchý povrch. Merania som realizoval iba na priamo. Na fotografii – obrázok 78 je možno vidieť miesto experimentálneho merania.



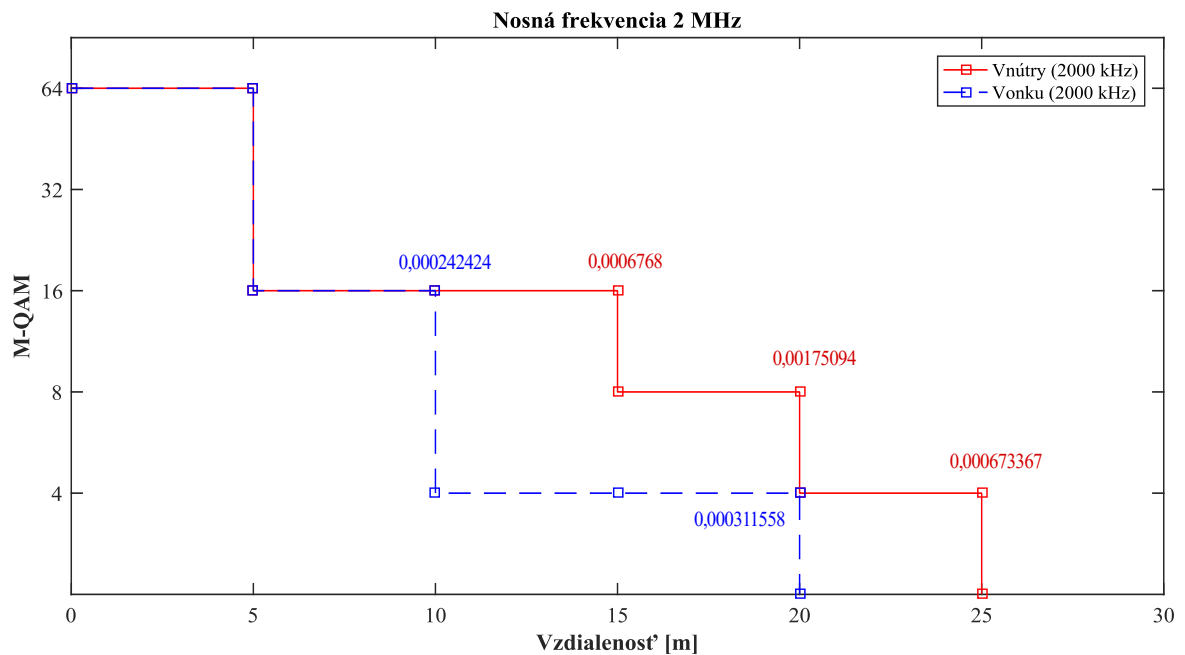
Obrázok 78 – Fotografia merania vonku

9.1 Predný svetlomet

Slnčné žiarenie spôsobovalo za saturovanie detektora. Fotodetektor zachytával množstvo slnečného žiarenia a tak bolo za potreby podstatne zníženie predzosilňovača na 20 dB. Odstup signálu od šumu bol teda podstatne nižší čo malo za následok výrazne slabší dosah a nárast chybovosti. Okrem iného určité nosné kmitočty nefungovali správne. Výsledky nosnej frekvencie na 2 – 2,5 MHz boli podstatne lepšie ako na nižších alebo vyšších kmitočtoch. Z toho dôvodu som vykrelil limity komunikácie na nosnom kmitočte 2 MHz pri šírke pásma 1000 a 2000 kHz.

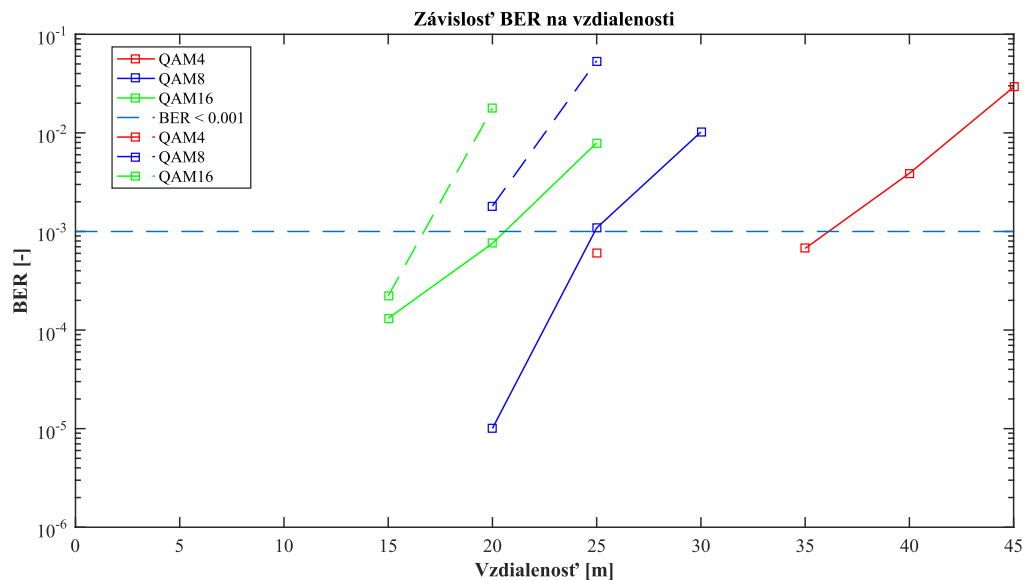


Obrázok 79 – Porovnanie limitov



Obrázok 80 – Porovnanie limitov

Vzájomne porovnanie týchto výsledkov ma za úlohu poukázať aký ma vplyv slnečné žiarenie na VLC komunikáciu. Slnečné žiarenie spôsobí snaženie rozdielu medzi užitočným signálom a šumom. Zisk na detektore rovnakým spôsobom zosilní signál a aj šum. Hodnota šumu sa vo vonkajšom prostredí zvýši a tak klesá dosah komunikácie.



Obrázok 81 – Porovnanie limitov

Najviac robustná modulácia je logický 4-QAM. Ta dosiahla aj pri vonkajších podmienkach dosah 35 m čo je ale o 10 metrov menej ako pri laboratórnych podmienkach pri zachovaní BER ktorá je menšia ako 0.001. Z obrázku 81 je možné vidieť tieto rozdiely. Pre porovnanie som zhotovil tabuľku chybovosti medzi vnútorným meraním a vonkajším pre rôzne parametre. Tabuľka 1.20 popisuje vzdialenosť 10 metrov. Informácie o iných vzdialenostiach možno nájsť v Prílohe I.

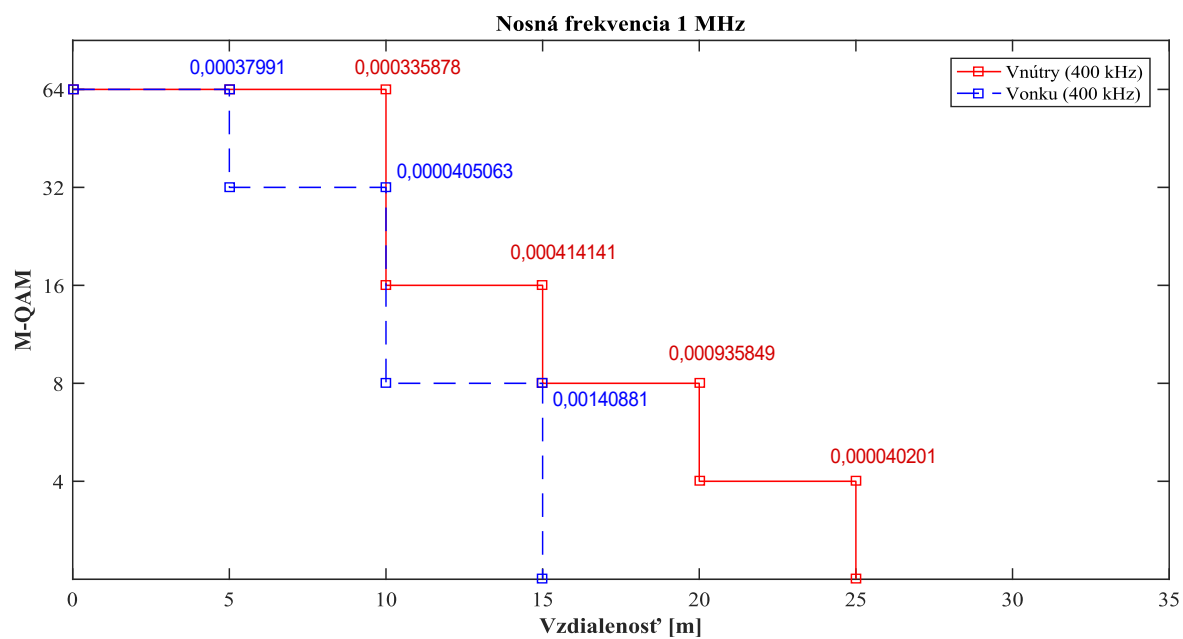
Tabuľka 1.20: Porovnanie chybovosti pre rôzne parametre

Šírka pásma [kHz]	Nosná frekvencia [MHz]	4-QAM		8-QAM		16-QAM	
		BER (ref)	BER (vonku)	BER (ref)	BER (vonku)	BER (ref)	BER (vonku)
1000	1,5	0	0	0	0,000966	0	0,00199
2000	1,5	0	0,000010	0	0,001730	0	0,002364
3000	1,5	0,000053	0,000251	0,001741	0,006611	0,002586	0,013081
1000	2	0	0	0	0	0	0
2000	2	0	0	0	0,000021	0	0,000242
3000	2	0,000021	0,000663	0,000594	0,010053	Nemerané	0,022879
1000	2,5	0	0	0	0	0	4,04E-05
2000	2,5	0	0	0	0,000021	0,000022	0,000758
3000	2,5	0,000023	0,000291	0,002244	0,01299	Nemerané	0,017869
1000	3	0	0	0	0	0	0,000152
2000	3	0	0	0,000043	0,000725	0,00022	0,005687
3000	3	0,000251	0,001387	Nemerané	0,01758	Nemerané	0,034586

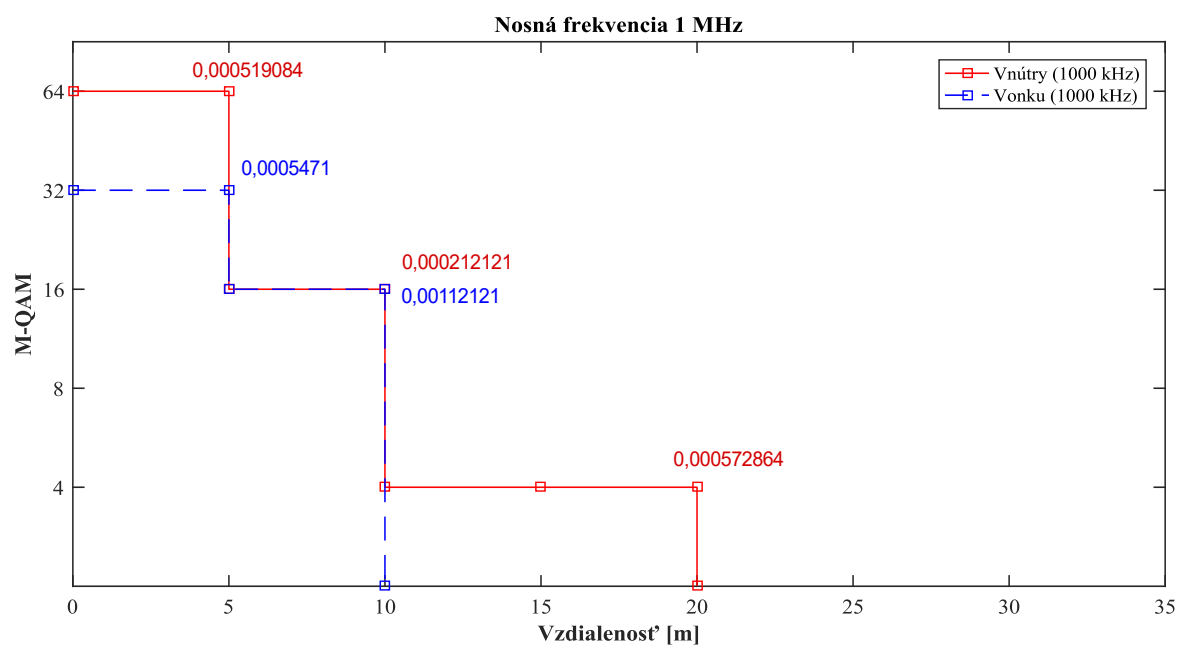
9.2 Zadný svetlomet

Tento svetlomet bol meraný počas polojasného počasia okolo 6 hodiny letného času. Preto nebolo za potreby také zníženie pred zosilňovača na fotodektore. Úroveň zosilnenia bola zmenená oproti laboratórnym podmienkam zo 60 dB na 40 dB. Aj tak bol dosah komunikácie znížený približne o 5 – 10 metrov.

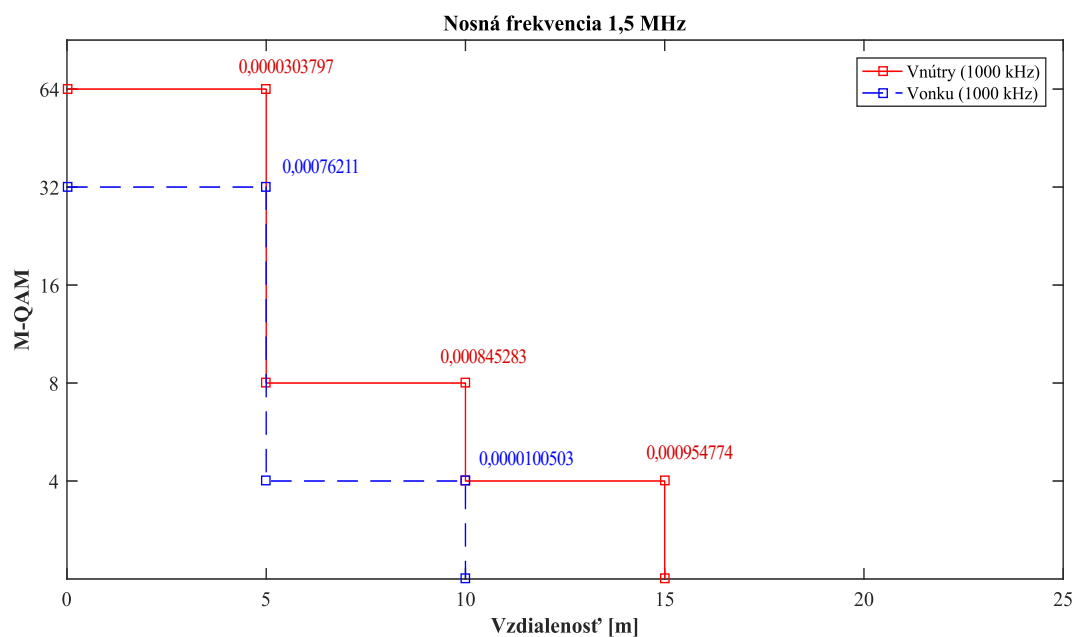
Obrázok 82 zrovnáva limity komunikácie na nosnom kmitočte 1 MHz a šírke pásma 400 kHz. To su parametre kanálu kedy bolo možné v laboratórnych podmienkach komunikovať najďalej a to na 25 metroch. Oproti laboratórnym podmienkam sa dosah znížil o 10 metrov. Je možné očakávať že pri úplne jasnom počasí by tento dosah mohol byť ešte nižší.



Obrázok 82 – Porovnanie limitov



Obrázok 83 – Porovnanie limitov



Obrázok 84 – Porovnanie limitov

Obrázky 83 a 84 taktiež popisujú dosiahnuteľné limity pre vonkajšie a laboratórne podmienky. Pri šírke pásma 1000 kHz a nosnej 1 MHz bol dosiahnutá vzdialenosť taktiež o 10 metrov menšia. Avšak pri nosnej frekvencii 1,5 MHz bol tento dosah slabší iba o 5 metrov. Tu však bol rozdiel už iba pri samotnom laboratórnom meraní kedy dosah prijateľnej komunikácie bol o 5 metrov menší.

Tabuľka 1.21 zobrazuje dosiahnuteľné chybovosti medzi vonkajším meraním a vnútorným počas rozdaných parametrov kanálu a vzdialenosti 5 metrov. Hodnota x značí že meranie pre tieto parametre neprebehlo.

Tabulka 1.21: *Porovnanie chybovosti pri rôznych parametroch*

Šírka pásma [kHz]	Nosná frekvencia [MHz]	4-QAM		8-QAM		16-QAM	
		BER (ref)	BER (vonku)	BER (ref)	BER (vonku)	BER (ref)	BER (vonku)
1000	1	0	0	0	0	0	0,000128
2000	1	0	0,000081	0,000674	0,000221	0,001333	0,000891
1000	1,5	0	0	0	0	0	0,000294
2000	1,5	0	0,000022	0,002204	0,00013	0,000899	0,000871
3000	1,5	0,00198	0,009871	0,013474	0,027866	0,018273	x
1000	2	0	0	0	0,000067	0,000031	0,001389
2000	2	0	0,000343	0,000161	0,000784	0,009414	0,029414
3000	2	0,001487	0,007561	0,014038	0,014787	0,024677	x
1000	2,5	0	0	0,000010	0,000977	0,000778	x
2000	2,5	0	0,000070	0,002234	x	0,011293	x
3000	2,5	0,006452	0,014442	x	x	x	x

Záver

Myslím si že VLC ma veľký potenciál v automobilovom priemysle. Komunikácia sa však stretáva s rôznymi problémami ako sú atmosférické javy či nepriama viditeľnosť. Práca, ktorá je tomu venovaná, zhodnocuje jednotlivé vplyvy a na základe dosiahnutých výsledkov si ju viem predstaviť o pár rokov ako podporný systém pre komunikáciu v automobilovej doprave, ktorá prinesie efektívnosť a užitočnosť.

Technika OFDM, ktorá bola použitá pri meraniach preukázala svoju užitočnosť. OFDM obsahuje rôzne metódy, ktoré chránia signál a robia ho tak viac odolný voči vonkajším vplyvom. Či už ochranný interval, cyklický prefix alebo samotná ortogonalita ponúkla dosah VLC vo vonkajšom prostredí vzdialenosť 25m pri šírke pásma 1000 kHz. Dôležitá je aj prenosová rýchlosť, ktorá na tejto vzdialenosti dosahuje 0,78 Mbit/s pre predný svetlomet. Tu je však možné zvýšiť samotnou modifikáciou OFDM. V navrhnutom OFDM boli totiž použité prehnane veľké ochranné intervaly. Záznam signálu je možné vidieť v kapitole o vibráciách. Medzi užitočnými zložkami je vidieť veľký časový úsek, ktorý je možné zmenšiť a dosiahnuť tak väčšej prenosovej rýchlosti.

V kapitole zoznam prístrojov som uviedol ako zvyšovaním zisku detektora sa znižuje šírka pásma, ktorú dokáže zosilňovať. Tento jav som však na prijímanom spektre vôbec nepostrehol. V laboratórnych podmienkach som pre predný svetlomet používal zisk 60 dB (okrem 5 metrov) čo odpovedá šírke pásma 11 kHz pre zisk. Komunikácia ale prebiehala aj na šírke pásma 2000 kHz pri väčšej vzdialenosti čo pripisuje zásluhám OFDM a jej odolnosti. Pri 30 metroch som sledoval signál ako sa správa pri rôznych zosilneniach detektoru a zistil som, že poklesom zisku sa mi zhoršuje kvalita prijímaného signálu. Pri zvýšení zisku na 70 dB som taktiež zhoršil kvalitu signálu.

Predný svetlomet preukázal podstatne lepšie výsledky pri každom aspekte merania oproti zadnému. Pri vzdialenosti 5 metrov bol možné použiť nosné kmitočty až do 5 MHz. Táto hranica klesala spolu so vzdialenosťou až na 45 metrov keby komunikácia prebiehala len na 1 MHz. Pri vyšších kmitočtoch ako 2,5 MHz však nebolo možné využiť ich potencionálnu šírku pásma. Pri šírke pásma väčšej ako 3,6 MHz začalo spektrum splývať so šumom čo mal za následok nárast chybovosti.

Zadný svetlomet, brzdová LED funkcia, pri 5 metroch zvládala komunikovať maximálne po 3,5 MHz nosného kmitočtu. Toto ohraničenie rapídne klesalo so vzdialenosťou na 25 metrov kedy nebolo možné použiť vyšší kmitočet ako 1 MHz. Obmedzenejšie to bolo aj čo sa týka šírky pásma. Šírka pásma bola nad 2 MHz praktický nepoužiteľná na vzdialenosti väčšej ako 10 metrov.

Negatívom práce že jednotlivé atmosférické javy nebolo možné merať súčasne. Javy ako dážď, hmla a slnečné počasie môžu v reálnom svete nastať súčasne. Dážď bol dobre simulovaný v laboratórnych podmienkach, zatiaľ čo hmlu dokážem len ťažko prirovnať k hmle.

Pozitívom pre takto dosiahnuté výsledky však ostáva, že testovanie prebiehalo len na jednom svetlomete. Každé auto obsahuje dva takéto svetlomety vzadu aj vpredu čo teda môže veľmi pomôcť realizovať komunikáciu aj keď sa budú auta nachádzať mimo ohniskovú polohu. Pokrytie komunikačného kanálu bude tak dva krát tak široké.

Použitá literatura

- [1] GHASSEMLOOY, Z., POPOOLA, W. and Rajbhandari, S., Optical wireless communications. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2012.
- [2] GOTO, Yuki, Isamu TAKAI a Takaya YAMAZATO. A New Automotive VLC System Using Optical Communication Image Sensor. IEEE Photonics Journal. 2016, 8, Number 3, June 2016. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2555582.
- [3] HAAS, Harald. 2011. Wireless data from every light bulb [video]. TEDGlobal [online]: TED. Dostupné z: http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
- [4] KUMAR, Navin, Domingos TERRA a Nuno LOURENCO. Visible Light Communication for Intelligent Transportation in Road Safety Applications. Aveiro, Portugal: Institute of Telecommunication, University of Aveiro, 2011.
- [5] LEE, It Ee, Moh Lim SIM a Fabian WAI LEE KUNG. A Dual-Receiving Visible-Light Communication System for Intelligent Transportation System. Cyberjaya, Malaysia: Faculty of Engineering, Multimedia University, 2008.
- [6] Optical OFDM Basics. SHIEH, William, Qi YANG a Abdullah Al AMIN. Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications. 7. Springer New York, 2011, s. 43-85. ISBN 978-1-4419-8138-7.
- [7] OTÝPKA, Miloslav. Modulace OFDM: Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením. 2009. Internetový portál elektrotechnika.
- [8] SARWAR, Rohail, Bin SUN a Meiwei KONG. Visible Light Communication Using a Solar-Panel Receiver. 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). 1Optical Communications Laboratory, Ocean College, Zhejiang University, 2017.
- [9] SHEN, Wen-Hsuan a Hsin-Mu TSAI. Testing Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communications in Real-World Driving Scenarios. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan: Department of Computer Science and Information Engineering, 2017.
- [10] YAMAZATO, Takaya, Isamu TAKAI a Hiraku OKADA. Image-Sensor-Based Visible Light Communication for Automotive Applications. IEEE Communications Magazine. Aveiro, Portugal: Institute of Telecommunication, University of Aveiro, 2014, (July 2014).
- [11] YOO, J.-H. a J.-S. JANG. Demonstration of vehicular visible light communication based on LED headlamp. International Journal of Automotive Technology. National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan: Department of

Computer Science and Information Engineering, 2016, 2016(Vol. 17, No. 2), 347–352. DOI: 10.1007/s12239-016-0035-8.

- [12] Kováč, Michal. Modulátor OFDM v obvod FPGA. Brno, 2015. [cit 21.5.2019]
- [13] Goerge, J. J., Mustafa, M. H., Osman, N. M., & et al. (2014). A Surveyon Visible Light Communication. International Journal Of Engineering And Computer Science. 3(2), 3805-3808, ISSN: 2319-7242.
- [14] Jaiswal, N. S., & Chopade, P. S. (2013), Review of Li-Fi technology: New Future Technology Light Bulb to Access ithe Internet, International Journal of Scientific & Engineering Research, 4(12). ISSN 2229-5518
- [15] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, “LED based indoor visible light communications: state of the art”, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 3, pp. 1649-78, 2015.
- [16] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, “Visible light commu- nication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges”, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 4, pp. 2047-2077, 2015.
- [17] S. H. Yu, et al., “Smart automotive lighting for vehicle safety”, IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 12, pp. 50-59, 2013.
- [18] A. M. Cailean, and M. Dimian, “Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: A survey”, IEEE Com- mun. Surveys Tuts., vol. 19, no. 4, pp. 2681-2703, 2017.
- [19] S. J. Lee, J. K. Kwon, S. Y. Jung, and Y. H. Kwon, “Evaluation of visible light communication channel delay profiles for automotive applications”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Net- working, 2012:370, pp. 1-8, 2012.
- [20] F. Hossain and Z. Afroze, “Eliminating the effect of fog attenuation on FSO link by multiple TX/RX system with trav- elling wave semiconductor optical amplifier,” in Proc. ICAEE, Dec. 2013, pp. 267–272.
- [21] S. Khare and N. Sahayam, “Analysis of free space optical communication system for different atmospheric condi- tions and modulation techniques,” Int. J. Mod. Eng. Res., vol. 2, no. 6, pp. 4149–4152, 2012.
- [22] M. Baskaran, S. Ethiraj, and T. Gokulakrishnan, “Eliminating the effects of fog and rain attenuation for live video streaming on free space optics,” Int. J. Syst., Algorithms Appl., vol. 3, no. 6, pp. 48–52, 2012.
- [23] N. A. Mohammed, A. S. El-Wakeel, and M. H. Aly, “Pointing error in FSO link under different weather conditions,”

- [24] J. Grubor, S. Randel, K. D. Langer, and J. W. Walewski, "Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting", *J. Light- wave Technol.*, vol. 26, no. 24, pp. 3883-3892, 2008.
- [25] Ab-Raham, M. S., Shuhaimi, N. I., Azizan, L. A., & et al. (2012). Analytical study of sinal-tonoise ratio for visible light communication by using signal source. *Journal of Computer Science*, 8(1), 1441-144. Doi:10.3844/jcssp.2012.1414.144
- [26] I. Kim, B. Mcarthur, and E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," in *Proc. SPIE*, Feb. 2001, pp. 31–34.
- [27] G.-y. Hu, C.-y. Chen, and Z.-q. Chen, "Free-space optical communication using visible light," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 8, no. 2, pp. 186–191, Feb. 2007.
- [28] H. Sizun, M. Alnaboulsi, O. Veyrunes, and O. Bouchet, "Free-space optical communication links," in *Proc. Eur. Workshop Integr. Radio-Commun. Syst.*, Angers, France, 2002.
- [29] Kumar, N., Nero, L. A., & Aguiar, R. L. (2006). Visible Light Communication for Advanced Driver Assistant Systems, The work is part of FCT project VIDAS. Retrieved from:
<http://www.av.it.pt/cinflete2009/pepers/38.pdf> accessed 17 december 2014
- [30] E. Lee, M. L. Sim, F. W. L. Kung, "A dual-receiving visible-light communication system under time-variant non-clear sky channel for intelligent transportation system", *Networks and Optical Communications (NOC) 2011 16th European Conference on*, pp. 153-156, 2011.
- [31] Alin-Mihai Căilean, Mihai Dimian, "Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: A Survey", *Communications Surveys & Tutorials IEEE*, vol. 19, no. 4, pp. 2681-2703, 2017.
- [32] N. Kumar, D. Terra, N. Lourenco, L. N. Alves, R. L. Aguiar, "Visible light communication for intelligent transportation in road safety applications," in *Proc. of IEEE International conf. on Wireless Communications and Mobile Computing Conf.*, pp. 1513-1518, July 2011.
- [33] D. R. Kim, S. H. Yang, H. S. Kim, Y. H. Son and S. K. Han, "Outdoor Visible Light Communication for inter-vehicle communication using Controller Area Network," *Communications and Electronics (ICCE)*, 2012 Fourth International Conference on, pp.31-34, Aug. 2012.

- [34] Yu, S.-H., Shih, O., Tsai, H.-M.: ‘Smart automotive lighting for vehicle safety’, *IEEE Commun. Mag.*, 2013, 51, (12), pp. 50–59
- [35] M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, and K. Kamakura, “Motion modeling of mobile transmitter for image sensor based i2v-vlc, v2i-vlc, and v2v-vlc,” in *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2014, Dec 2014, pp. 450–455.
- [36] A.-L. Chen, H.-P. Wu, Y.-L. Wei, and H.-M. Tsai, “Time variation in Vehicle-to-Vehicle visible light communication channels,” in *Proc. IEEE Veh. Netw. Conf. (VNC)*, Dec. 2016, pp. 21–28.
- [37] I. Takai, T. Harada, M. Andoh, K. Yasutomi, K. Kagawa, and S. Kawahito, “Optical vehicle-to-vehicle communication system using LED transmitter and camera receiver,” *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 5, Oct. 2014, Art. no. 7902513.
- [38] Yamazato, T., Takai, I., Okada, H., et al.: ‘Image-sensor-based visible light communication for automotive applications’, *IEEE Commun. Mag.*, 2014, 52, (7), pp. 88–97
- [39] Y. Imai, T. Ebihara, and K. Mizutani, and N. Wakatsuki, “Performance Evaluation of High-Speed Visible Light Communication Combining Low-Speed Image Sensor and Polygon Mirror In an Outdoor Environment,” *ICUFN* 2016, pp.51-55, Jul. 2016.
- [40] Yamazato, T. *J. Commun. Inf. Netw.* (2017) 2: 65.
<https://doi.org/10.1007/s41650-017-0044-4>
- [41] Luby, M., Vicisano, L., Gemmell, J., Rizzo, L., Handley, M., and J. Crowcroft, "Forward Error Correction (FEC) Building Block", RFC 3452, DOI 10.17487/RFC3452, December 2002, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc3452>>.
- [42] M. Elamassie, M. Karbalayghareh, F. Miramirkhani, R. C. Kizilirmak and M. Uysal, "Effect of Fog and Rain on the Performance of Vehicular Visible Light Communications," 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417738
- [43] K. J. Ebrahim and A. Al-Omary, "Sandstorm Effect on Visible Light Communication," 2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), Manama, 2017, pp. 1-7. doi: 10.1109/IEEEGCC.2017.8448035
- [44] Y. H. Kim, W. A. Cahyadi and Y. H. Chung, "Experimental Demonstration of VLC-Based Vehicle-to-Vehicle Communications Under Fog Conditions," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1-9, Dec. 2015,

Art no.
doi: 10.1109/JPHOT.2015.2499542

7905309.

Priložené CD

Štruktúra prílohy na CD:

- I. Príloha : Kapitola 5 a 9 (Predný a zadný svetlomet, nosná, šírka, uhly, vonkajšie)
- II. Príloha : Kapitola 6 (Predný a zadný svetlomet, dážď)
- III. Príloha : Kapitola 7 (Predný a zadný svetlomet, hmla)
- IV. Príloha : Kapitola 8 (Predný a zadný svetlomet, vibrácie)